

EVALUACIÓN DEL DESEMPEÑO DE UN M.C.I. OPERANDO CON UN SISTEMA  
DE ENCENDIDO MULTICHISPA

DANIEL QUICENO RIVERA

1 093 217 506

UNIVERSIDAD TECNOLÓGICA DE PEREIRA

FACULTAD DE INGENIERÍA MECÁNICA

PEREIRA

2014

EVALUACIÓN DEL DESEMPEÑO DE UN M.C.I. OPERANDO CON UN SISTEMA  
DE ENCENDIDO MULTICHISPA

DANIEL QUICENO RIVERA

1 093 217 506

Trabajo de grado

Director: Ing. Carlos Alberto Romero Piedrahita

UNIVERSIDAD TECNOLÓGICA DE PEREIRA

FACULTAD DE INGENIERÍA MECÁNICA

PEREIRA

2014

Nota de aceptación:

---

---

---

---

---

---

---

Firma del presidente del jurado

---

Firma del jurado

---

Firma del jurado

Pereira 25 de Febrero de 2014

## DEDICATORIA

*A toda mi familia, en especial a mi tía Elizabeth, a mi abuela y a mi madre, quienes no dudaron ni un solo momento en brindarme todo su apoyo para cumplir mi sueño.*

*DANIEL QUICENO RIVERA*

## Agradecimientos

*A mis maestros y profesores por enseñarme a ser mejor persona y encontrar en las respuestas que en algún momento me dieron luz para seguir en mi búsqueda del conocimiento.*

## CONTENIDO

### INTRODUCCIÓN

#### 1. GENERALIDADES DEL PROCESO DE COMBUSTIÓN

##### 1.1 INFLUENCIA DE DIFERENTES FACTORES SOBRE EL PROCESO DE COMBUSTIÓN EN MOTORES DE ENCENDIDO POR CHISPA

###### 1.1.1 Composición de la mezcla

###### 1.1.2 Carga del motor

###### 1.1.3 Relación de compresión

###### 1.1.4 Frecuencia de rotación

###### 1.1.5 Avance del encendido

###### 1.1.6 Forma de la cámara de combustión

##### 1.2 PRINCIPALES ALTERACIONES DE LA COMBUSTIÓN NORMAL EN LOS MOTORES DE ENCENDIDO POR CHISPAS

###### 1.2.1 Detonación

###### 1.2.2 Autoencendido prematuro

###### 1.2.3 Autoencendido retrasado

###### 1.2.4 Autoencendido por compresión estando el sistema de ignición desconectado

##### 1.3 CARACTERISTICAS DE REGULACIÓN

##### 1.4 MODOS DE CONTROL EN LOS SISTEMAS ELECTRÓNICOS

##### 1.5 ARRANQUE Y CALENTAMIENTO DEL MOTOR

#### 2. OPERACIÓN DE LOS SISTEMAS DE ENCENDIDO, ELEMENTOS DE MODELADO Y DIAGNOSTICO

##### 2.1 SISTEMA DE ENCENDIDO

##### 2.2 TRABAJO DEL SISTEMA DE ENCENDIDO CONVENCIONAL

##### 2.3 TRANSFERENCIA DE CALOR DURANTE EL PROCESO DE ENCENDIDO

##### 2.4 DESCRIPCIÓN Y PARTICULARIDADES DE OPERACIÓN DE LOS SISTEMAS DE ENCENDIDO

- 2.4.1 Sistema de encendido transistorizado
- 2.4.2 Sistema de encendido de descarga capacitiva
- 2.5 CÁLCULO DEL SISTEMA DE ENCENDIDO CONVENCIONAL
- 2.6 OSCILOGRAMAS DEL ENCENDIDO
  - 2.6.1 Oscilograma primario
  - 2.6.2 Oscilograma secundario
- 2.7 IONIZACIÓN DE LA MEZCLA ENTRE LOS ELECTRODOS DE LA BUJÍA
- 2.8 COMPONENTES COMERCIALES DEL SISTEMA DE ENCENDIDO
- 3. MODELADO, SIMULACIÓN DEL SISTEMA DE ENCENDIDO COMO CIRCUITO ELÉCTRICO Y ADAPTACIÓN DE UN SISTEMA DE ENCENDIDO MULTICHISPA
- 4. DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN BANCO PARA PRUEBAS DEL SISTEMA DE ENCENDIDO
  - 4.1 DESCRIPCIÓN DEL BANCO
  - 4.2 PRUEBAS DEL SISTEMA DE ENCENDIDO CONVENCIONAL
- 5. RESULTADOS COMPARATIVOS DE LAS PRUEBAS DE DESEMPEÑO DEL MOTOR, OPERANDO CON EL SISTEMA DE ENCENDIDO ORIGINAL Y EL SISTEMA DE ENCENDIDO MULTICHISPA
  - 5.1 CARACTERIZACIÓN DEL SISTEMA DE ENCENDIDO ORIGINAL DEL MOTOR
  - 5.2 ADECUACIÓN DEL MOTOR
  - 5.3 ACCESORIOS DEL MOTOR
  - 5.4 ESPECIFICACIONES DEL EQUIPO E INSTRUMENTOS DE MEDICIÓN
    - 5.4.1 Manómetro
    - 5.4.2 Sensor de carga
    - 5.4.3 Medidor de frecuencia de giro
  - 5.5 CONDICIONES DEL ENSAYO
  - 5.6 PROCEDIMIENTO DEL ENSAYO
  - 5.7 DATOS A REGISTRAR

5.8 RESULTADOS

CONCLUSIONES

RECOMENDACIONES

BIBLIOGRAFIA



## LISTA DE TABLAS

Tabla 1. Distribución de energía en la fase de ruptura, arco y resplandor de la descarga.

Tabla 2. Especificaciones del motor.

Tabla 3. Accesorios del motor.

Tabla 4. Tabla utilizada para la toma de datos.

Tabla 5. Cálculo de la potencia del motor con el sistema de encendido original.

Tabla 6. Cálculo de la potencia del motor con el sistema de encendido multichispa.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Fases del proceso de combustión.

Figura 2. Esquemas de propagación de la llama.

Figura 3. Presión en la cámara de combustión en función del ángulo de giro del cigüeñal.

Figura 4. Diagrama indicado de presión, temperatura y coeficiente de desprendimiento activo.

Figura 5. Diagramas indicados de presión de una serie de ciclos consecutivos.

Figura 6. Diagrama indicado de presión a diferentes velocidades.

Figura 7. Presión en el cilindro en función del ángulo de avance del encendido.

Figura 8. Antecámara de combustión.

Figura 9. Diagrama indicado de presión cuando se presenta golpeteo.

Figura 10. Octanaje requerido de la gasolina en función de la relación de compresión.

Figura 11. Octanaje requerido de la gasolina en función de la frecuencia de giro.

Figura 12. Diagrama indicado de autoencendido prematuro.

Figura 13. Diagrama indicado de autoencendido retrasado.

Figura 14. Característica de regulación de un motor a gasolina en función del consumo de combustible.

Figura 15. Característica de regulación de un motor a gasolina en función del ángulo de avance de la chispa.

Figura 16: Circuito de encendido convencional.

Figura 17. Variación de voltaje y corriente de un sistema de encendido convencional.

Figura 18. Energía transferida al núcleo de la llama en función de la energía eléctrica suministrada.

Figura 19. Temperatura y flujo de calor promedio en el proceso de encendido.

Figura 20. Flujo de calor en función del ángulo de giro.

Figura 21. Sistema de encendido transistorizado con un generador de pulsos inductivo.

Figura 22. Sistema de descarga capacitiva CDI.

Figura 23. Esquema sustitutivo del sistema de encendido después de cerrarse los platinos.

Figura 24. Oscilogramas de la corriente primaria de la bobina de encendido a distintas frecuencias de rotación del motor. a)  $n_m=1000$  rpm; b)  $n_m=2000$  rpm

Figura 25. Esquema sustitutivo del sistema de encendido por batería después de abrirse los platinos (segunda etapa).

Figura 26. Amortiguación de la tensión primaria.

Figura 27. Tensión secundaria en función de la corriente de desprendimiento.

Figura 28. Influencia del coeficiente de transformación y la resistencia de shunt.

Figura 29. Influencia de la capacitancia  $C_1$  del condensador primario sobre la tensión de la bobina  $U_2$ .

Figura 30. Variación de la corriente primaria  $I_1$  y de la tensión secundaria  $U_2$

Figura 31. Tensión  $U_{2m}$  creada por el sistema de encendido, en función de la frecuencia de rotación  $n_m$  del cigüeñal: 1- teórica, 2- experimental.

Figura 32. Conceptos de encendido “flame-jet” y ubicación de la bujía.

Figura 33. Oscilograma de encendido en el bobinado primario.

Figura 34. Oscilograma de encendido en el bobinado secundario.

Figura 35. Fases de la ionización de la mezcla entre los electrodos de la bujía.

Figura 36. Bobinas de encendido.

Figura 37. Bujía.

Figura 38. Circuito eléctrico básico del sistema de encendido.

Figura 39. Oscilador biestable.

Figura 40. Circuito final de la simulación.

Figura 41. Oscilograma primario obtenido de la simulación.

Figura 42. Oscilograma secundario obtenido de la simulación.

Figura 43. Sistema de encendido multichispa.

Figura 44. Diagrama de conexión del equipo al motor.

Figura 45. Diagrama esquemático del sistema de encendido convencional.

Figura 46. Banco de pruebas del sistema de encendido.

Figura 47. Oscilograma de encendido primario.

Figura 48. Oscilograma de encendido secundario.

Figura 49. Módulo de encendido del motor o centralita.

Figura 50. Esquema del circuito de encendido sin contactos (BOSCH).

Figura 51. Freno de disco solidario al cigüeñal.

Figura 52. Mecanismo para el accionamiento del freno.

Figura 53. Sensor de carga.

Figura 54. Manómetro de presión.

Figura 55. Carburador nuevo.

Figura 56. Tubería de escape.

Figura 57. Mangueras para la circulación del agua de enfriamiento.

Figura 58. Tanque de combustible

Figura 59. Curvas de operación del motor operando con el sistema de encendido electrónico convencional.

Figura 60. Curvas de operación del motor operando con el sistema de encendido multichispa.

## LISTA DE ANEXOS

- A. VALORES UTILIZADOS PARA LAS RESISTENCIAS, INDUCTANCIAS, Y CAPACITANCIAS DEL CIRCUITO EN LA SIMULACIÓN
- B. CÁLCULO DE LA POTENCIA DEL MOTOR
- C. CÁLCULO DEL PAR
- D. EJEMPLO DE CÁLCULO DE LA POTENCIA DEL MOTOR
- E. FACTORES DE CORRECCIÓN DE POTENCIA
- F. DATOS DE OPERACIÓN DEL MOTOR CON EL SISTEMA DE ENCENDIDO ORIGINAL
- G. DATOS DE OPERACIÓN DEL MOTOR CON EL SISTEMA DE ENCENDIDO MULTICHISPA
- H. CIRCUITO DE UN SISTEMA DE ENCENDIDO MULTICHISPA

## INTRODUCCIÓN

En el presente trabajo se realizó una comparación de un sistema de encendido electrónico convencional con un sistema de encendido multichispa (MSD - Multiple Spark Discharge) en un mismo motor de combustión interna a gasolina. El encendido convencional presenta una sola descarga o chispa en cada ciclo de combustión, a diferencia del encendido MSD que puede presentar varias descargas por ciclo dependiendo del régimen de operación.

Algunas investigaciones realizadas a en los diferentes sistemas de encendido utilizados actualmente han encontrado que la relación entre el efecto específico de cada sistema sobre el núcleo inicial del frente de llama y la composición de la mezcla en el cilindro determinan el resto del proceso de encendido del combustible. Es así como para altas cargas, una descarga de alta duración puede ser menos eficiente que una de menor energía más corta, porque presenta un periodo más corto de iniciación de la llama. Sin embargo una gran descarga de energía produce una tasa de quemado más rápida en ralentí y cargas bajas.

La metodología utilizada para el desarrollo del proyecto consistió en primer lugar en una investigación del proceso de combustión en los motores de encendido provocado por chispa, ya que también existen con encendido por un filamento incandescente o por plasma de radiofrecuencia. Teniendo en cuenta la importancia del sistema de encendido en este proceso de combustión, en el segundo capítulo se resumió la teoría y algunas variaciones constructivas y tecnológicas de este sistema.

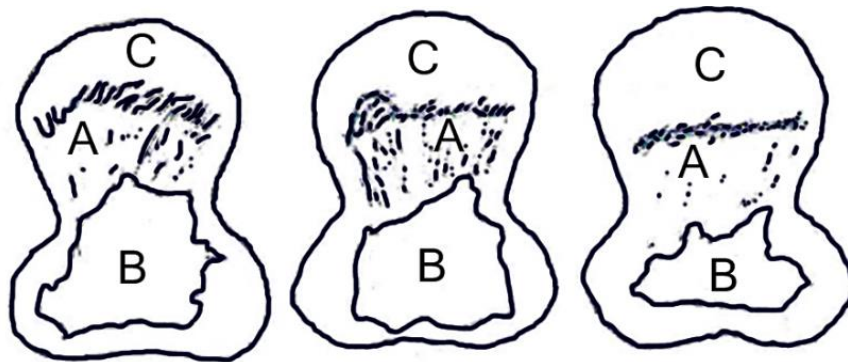
A continuación se empieza a desarrollar el tema central del proyecto, evaluar el desempeño de un motor de combustión interna operando con un sistema de encendido multichispa. En el tercer capítulo se referencia el sistema de encendido probado que consiste en un módulo portátil de fácil adaptación a cualquier motor de encendido por chispa que funcione con un distribuidor.

En el cuarto capítulo se diseñó y construyó un banco de pruebas para analizar señales y visualizar los oscilogramas del sistema de encendido sin necesidad de tener un motor en operación. Finalmente en el quinto capítulo se encuentran los resultados comparativos de las pruebas de desempeño de un motor HERCULES operando con el sistema de encendido original y con el sistema de encendido multichispa.

## 1. GENERALIDADES DEL PROCESO DE COMBUSTIÓN

Siendo normal el proceso de funcionamiento de los motores de encendido por chispa, la mezcla de combustible evaporado, aire y gases residuales lo suficiente homogénea se enciende por la chispa eléctrica y se quema en el proceso de propagación a lo largo de toda la carga del frente de la llama turbulenta. Este proceso se puede dividir en 3 fases: La I – llamada inicial, durante la cual un pequeño foco de combustión que surge en la zona de altas temperaturas entre los electrodos de la bujía (en la vena de la chispa la temperatura sobrepasa los  $10\,000\text{ }^{\circ}\text{C}$ ) progresivamente se transforma en un amplio frente de la llama turbulenta; La II – o fase principal – en la que ocurre la rápida propagación de la llama turbulenta a través de la mayor parte de la cámara de combustión, siendo prácticamente constante el volumen de esta última, puesto que el émbolo se encuentra cerca del PMS; La III – fase de combustión residual de la mezcla detrás del frente de la llama, en las capas cercanas a las paredes y en los huecos entre la culata y la cara del pistón, esta fase abarca parte de la carrera de expansión.

Figura 1. Fases del proceso de combustión.



A) Frente de llama    B) Zona de inflamación    C) Mezcla no quemada

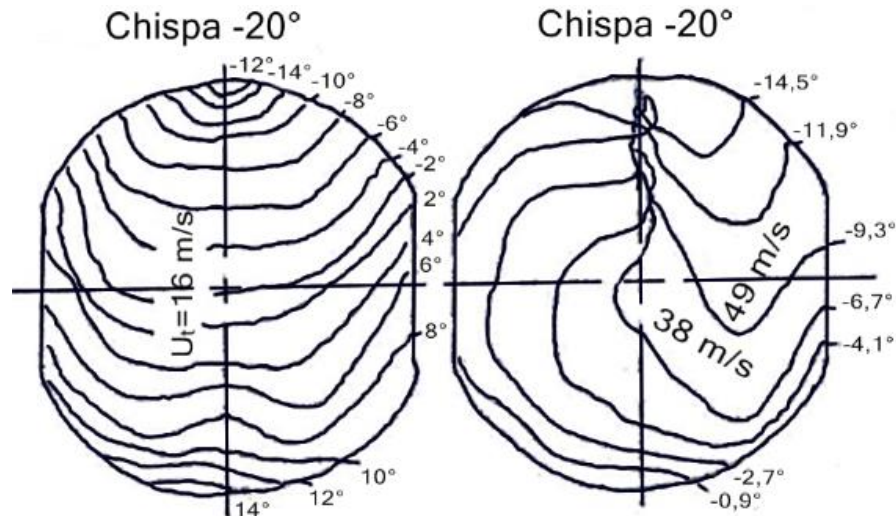
ROMERO, Carlos Alberto. Termodinámica de los M.C.I. Pereira.: Universidad Tecnológica de Pereira, 1990. p. 18.

Para tener una clara idea sobre el carácter de la propagación de la llama se muestran algunas fotografías tomadas durante una filmación a alta velocidad a través de una mirilla transparente (de cuarzo) instalada en la culata (ver figura 1).

En la figura 2 se ilustran los esquemas de propagación de la llama en un motor a gasolina al variar el carácter del movimiento turbulento de la mezcla de trabajo en la cámara de combustión. Conociendo los intervalos de tiempo entre las posiciones consecutivas del frente de la llama puede determinarse la velocidad de

su propagación en cualquier sector. Al principio, mientras el foco de combustión es pequeño, la velocidad de la llama es relativamente baja, ya que sobre ella influyen solamente pulsaciones turbulentas de pequeñas dimensiones.

Figura 2. Esquemas de propagación de la llama.



Ibíd., p. 19.

En este periodo la velocidad de combustión preponderantemente se determina por las propiedades físico-químicas de la mezcla carburante.

A medida que crecen las dimensiones del foco inicial de la llama, con mayor grado se reflejará la acción positiva de las pulsaciones turbulentas mayores sobre la velocidad de combustión. En la fase principal la velocidad de propagación de la llama es aproximadamente proporcional a la intensidad que, a su vez, crece proporcionalmente con la frecuencia de rotación del cigüeñal. En consecuencia, la duración de la fase principal de la combustión, expresada en grados de rotación del cigüeñal, a igualdad de las demás condiciones, casi no depende del régimen de velocidad del motor.

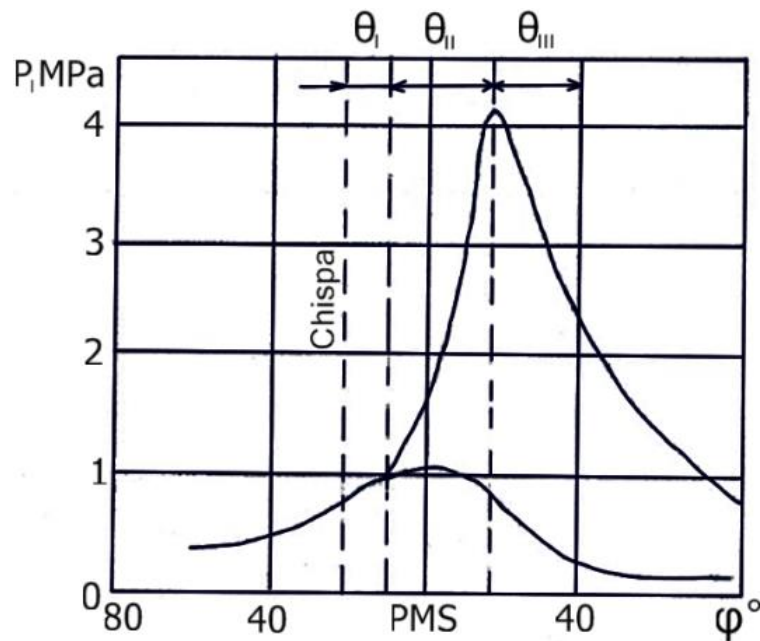
En la figura 2 se indican los valores medios de las velocidades visibles de propagación de la llama  $U_t$  en algunos sectores. Si la frecuencia de rotación es más elevada, estas velocidades considerablemente se incrementan y en los motores rápidos modernos a gasolina ellas alcanzan en la parte central de la cámara de combustión de  $60 \text{ m/s}$  a  $80 \text{ m/s}$ .

Al acercarse el frente de llama a las paredes la velocidad de su propagación disminuye, lo que se explica por la menor intensidad de la turbulencia en las capas cercanas a dichas paredes. Cuando la llama alcanza las paredes en la mayor parte de la cámara, la velocidad de combustión decrece también como consecuencia de la disminución, sin embargo, aquí no termina. Durante un tiempo



aún suficiente del frente de la llama, pero la combustión, sin embargo, aquí no termina. Durante un tiempo aun suficientemente prolongado continúan los procesos de combustión residual en las capas cercanas a las paredes y detrás del frente de la llama turbulenta. La velocidad de la combustión residual, de la misma manera que el proceso en su fase inicial, en mayor medida depende de las propiedades físico-químicas de la mezcla de trabajo que la velocidad en la fase principal.

Figura 3. Presión en la cámara de combustión en función del ángulo de giro del cigüeñal.



Ibíd., p. 21.

Trazar los límites bien definidos entre las diferentes fases del proceso de combustión en los motores no es posible, ya que el carácter y las velocidades de combustión varían gradualmente.

Como instante de culminación de la primera fase de combustión y el comienzo de la fase principal en los motores de encendido por chispa generalmente se adopta el "punto de separación" de la línea de combustión respecto a la línea de compresión en el diagrama indicado, es decir el instante en que comienza el brusco incremento de la presión como resultado de la combustión (ver figura 3).

La fase inicial dura desde el instante en que salta la chispa entre los electrodos de la bujía hasta el "punto de separación". Por analogía con los motores Diesel a veces este lapso convencionalmente se denomina periodo de retraso de la inflamación, o periodo de inducción, lo que en principio no es cierto. Siendo el encendido por chispa, el retraso de la inflamación prácticamente no existe. Cerca

de los electrodos de la bujía inmediatamente surge el foco de combustión, pero hay un período, durante el cual el frente de la llama desde este foco se propaga en forma relativamente lenta y la fracción de mezcla quemada es todavía tan pequeña que el incremento de la presión en el diagrama indicado no se registra.

Así por ejemplo, si el cambio de presión constituye el 1 % de la presión máxima de combustión, lo que aproximadamente corresponde a la combustión del 1,5 % de la mezcla de trabajo, entonces el volumen que ocupan los productos de combustión será ya cerca del 5 % del volumen de la cámara (adoptamos que la relación de expansión de los gases quemados en la combustión es  $\lambda = 3,3$ ). Comparando los gráficos (figuras 2 y 3) se concluye que hacia el instante en que comienza la fase principal de la combustión el “punto de separación” (8° antes del PMS) el radio medio de la semiesfera de la llama constituye cerca del 30% del radio de la cámara de combustión. Semejantes dimensiones del foco inicial de la combustión son ya suficientes para que sea posible el ulterior desarrollo rápido de la velocidad de propagación de la llama bajo la acción de las pulsaciones turbulentas de grandes dimensiones.

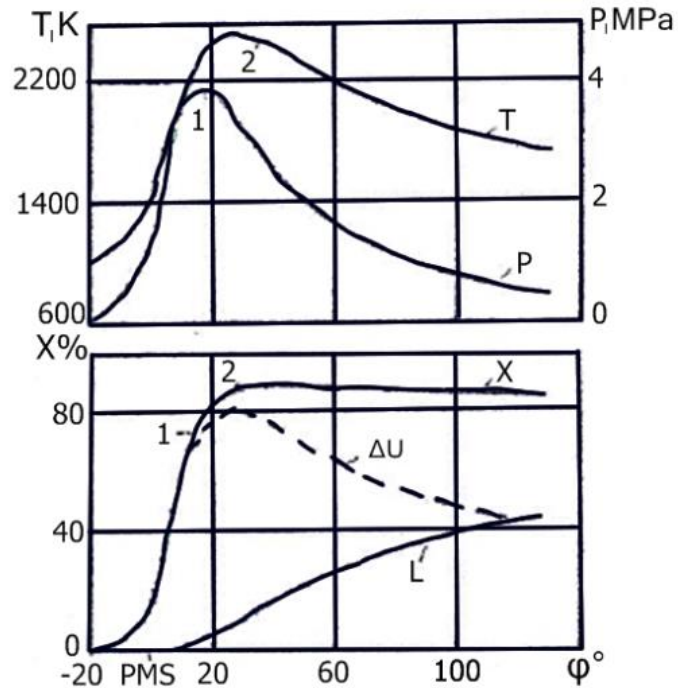
El límite de separación entre la fase principal y final de la combustión en los motores que funcionan con combustible ligero, convencionalmente, por lo general, se adopta el instante en que se alcanza la presión máxima en el diagrama indicado (punto 1 de la figura 4).

La combustión, sin embargo, aún no acaba y la temperatura media de los gases en el cilindro continúa creciendo cierto tiempo, alcanzando su máximo valor en el punto 2 de la figura 4.

Sin embargo, la disminución de la velocidad de desprendimiento de calor, debido a que el frente de la llama en la mayor parte de la cámara de combustión alcanza las paredes, conduce a que el incremento de presión por efecto de la combustión, ya no puede compensar su caída de presión a causa de la expansión de los gases, originada por el movimiento del pistón y la transmisión de calor a las paredes.

La efectividad del proceso de trabajo en el cilindro del motor se determina tanto por la plenitud total de la combustión, como por su velocidad, es decir, depende de la oportunidad con que se realiza el desprendimiento del calor, para asegurar una relación de expansión de los productos de combustión cercana a la relación de compresión geométrica. El trabajo máximo del ciclo, y por lo tanto las máximas potencias y economía del motor que funciona con combustible ligero, a igualdad de las demás condiciones, se logra organizando el proceso de combustión de tal manera que los puntos del comienzo y final de la fase principal estén aproximada y simétricamente dispuestos con respecto al PMS. Esto se puede obtener instalando en el lugar correspondiente el instante de la ignición. El ángulo, en grados de rotación del cigüeñal, desde el instante en que salta la chispa en la bujía hasta el PMS se denomina ángulo de avance al encendido  $\theta_e$ .

Figura 4. Diagrama indicado de presión, temperatura y coeficiente de desprendimiento activo.



Ibíd., p. 23.

El ángulo de avance al encendido debe ser tanto mayor, cuanto mayor sea la duración de la fase inicial de la combustión  $\theta_I$  (ver figura 3), así como también cuanto más lentamente se desarrolla la combustión en la fase principal.

En los motores rápidos modernos de combustible ligero con relaciones de compresión  $\epsilon = 8 \dots 9$ , la potencia máxima generalmente corresponde al instante cuando la máxima presión se alcanza a los  $12^\circ - 15^\circ$  después del PMS; además, la duración de la fase principal de la combustión es  $\theta_{II} = 25^\circ \dots 30^\circ$ .

La velocidad de desprendimiento de calor en la fase principal es la que determina la rapidez de incremento de la presión en función del ángulo de rotación del cigüeñal ( $\partial p / \partial \varphi$ ), y correspondientemente, la dinámica de acción de las fuerzas de los gases sobre las piezas del mecanismo biela-manivela, de la cual depende la denominada "rigidez" de funcionamiento del motor. La magnitud  $\partial p / \partial \varphi$  depende de la velocidad con que transcurre el proceso en la fase de combustión rápida. Para iguales valores de  $\partial p / \partial \varphi$ , pero siendo más suave el desarrollo del proceso, el motor funciona con menos ruido. En los motores con moderadas relaciones de compresión (6-7) los valores máximos de  $\partial p / \partial \varphi$  generalmente constituyen  $0,1 - 0,12 \text{ MPa}/^\circ$ . Para valores más elevados de la relación de

compresión  $\varepsilon = 9 \dots 10$ , la velocidad de elevación de la presión alcanza 0,15 – 0,2 MPa/°.

La relación entre los procesos de combustión y la utilización del calor desprendido en los motores se determina por las curvas características de desprendimiento activo de calor, que en sí representa la variación, en función del ángulo  $\varphi$ , de la fracción de calor, utilizada en elevar la temperatura del fluido operante (de su energía interna) y en realizar el trabajo externo, con respecto al calor total introducido al ciclo:

$$X = \frac{\Delta U + \int p dV}{Q}$$

En la figura 4 se muestra, en calidad de ejemplo, una parte del diagrama indicado, desde el instante de la ignición hasta el comienzo de apertura de la válvula de escape, así como las curvas de la temperatura media  $T$  de los gases en el cilindro, del trabajo exterior de los gases, sus energías internas  $\Delta U$  y del coeficiente de desprendimiento activo de calor  $X$ , en función del ángulo  $\varphi$  para el motor GAZ-21 cuando funciona con la mariposa de gases completamente abierta.

En el punto 1, correspondiente a  $P_{m\acute{a}x}$ , la cantidad de calor desprendido activo abarca 73%; en la fase de combustión residual la misma alcanza el 85% del calor de combustión disponible. El punto 2, que corresponde a la  $T_{m\acute{a}x}$  está situado a 11% del punto 1. El 15% restante lo conforman las pérdidas de calor a las paredes y las debidas a la combustión incompleta. Al funcionar los motores en regímenes de media carga o con mezclas empobrecidas, los valores de  $X$  en el punto  $P_{m\acute{a}x}$  generalmente no sobrepasan el 50% y el proceso de combustión residual resulta sustancialmente más prolongado.

Para aumentar la plenitud de la combustión hay que crear una turbulización adicional de la carga en las zonas de combustión residual.

## 1.1 INFLUENCIA DE DIFERENTES FACTORES SOBRE EL PROCESO DE COMBUSTIÓN EN MOTORES DE ENCENDIDO POR CHISPA

### 1.1.1 Composición de la mezcla.

La composición de la mezcla de trabajo. (coeficiente de exceso de aire  $\alpha$ ) ejerce influencia sobre la velocidad de combustión y la cantidad de calor desprendido, lo que se refleja en el cambio de la presión y de la temperatura de los gases en el cilindro del motor.

En la figura 5 se reproducen, como ejemplo, diagramas indicados superpuestos de una serie de ciclos consecutivos, obtenidos para diferentes composiciones de la mezcla y ángulos óptimos  $\varphi_e$ , correspondientes en cada caso a la potencia máxima del motor.

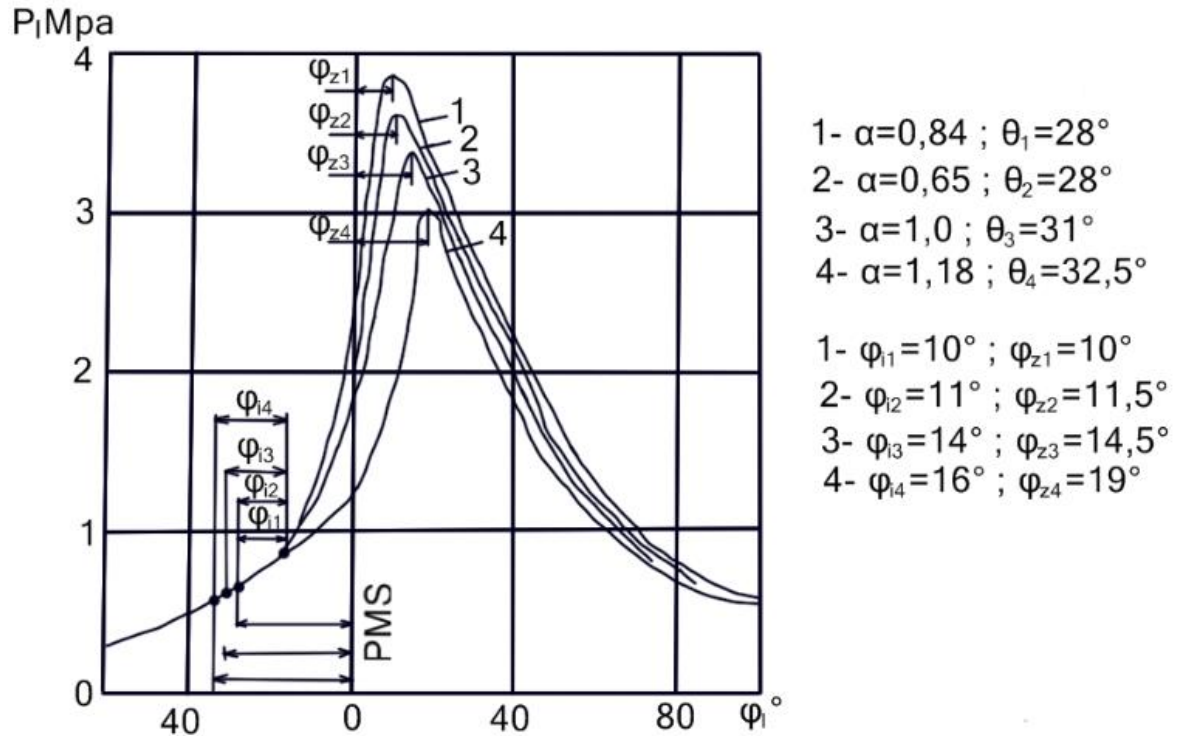
Los mínimos valores de  $\varphi_e$ ,  $\theta_I$ ,  $\theta_{II}$  y los máximos de  $P_z$  se consiguen para  $\alpha = 0,85-0,90$ , en caso del cual se observan las mayores velocidades de propagación de la llama y de intensidad en el desprendimiento de calor, y por lo tanto, la máxima potencia desarrollada por el motor. Esta composición de la mezcla se denomina *composición de potencia*. Cuando  $\alpha > 0,9$  la duración de la fase inicial  $\theta_I$  aumenta, lo que suscita la necesidad de incrementar el ángulo  $\varphi_e$ . La duración de la fase principal  $\theta_{II}$  varía insignificadamente, aunque las presiones máximas  $P_z$  disminuyen, debido al menor contenido energético de la mezcla y, por lo tanto, disminuyen los valores de  $\partial p / \partial \varphi$

Al empobrecer la mezcla más allá de cierto límite, que depende de las particularidades estructurales del motor, de su carga y de la relación de compresión, la combustión en los ciclos sucesivos de trabajo comienza a desarrollarse desigualmente; en algunos ciclos transcurre con suficiente velocidad, en otros deceleradamente (figura 5).

Semejante desarrollo irregular de la combustión en algunos ciclos, que está vinculado con el empeoramiento de las condiciones de ignición por la chispa de las mezclas pobres y de propagación de la llama, conduce a que comenzando desde ciertos valores de  $\alpha$  la efectividad media del proceso de trabajo, referida a todo el conjunto de los ciclos sucesivos, disminuye y el trabajo del motor se hace inestable.

La composición de la mezcla correspondiente al mínimo consumo específico efectivo de combustible en un régimen de funcionamiento dado del motor se denomina *composición económica*. En los motores modernos de automóvil, con relaciones de compresión cercanas a 8, al abrir la mariposa de gases hasta la posición cercana a la máxima, los valores de  $\alpha_{ec}$  para la composición económica de la mezcla oscilan generalmente entre 1,15 – 1,2.

Figura 5. Diagramas indicados de presión de una serie de ciclos consecutivos.



Ibíd., p. 29.

### 1.1.2 Carga del motor

A medida que disminuye la potencia del motor al cerrar un poco la mariposa de gases, decrecen las presiones iniciales y finales de compresión y se incrementa el grado de dilución de la mezcla de trabajo con los gases residuales. Esto conduce en primer lugar al considerable empeoramiento de las condiciones de ignición de la mezcla por la chispa y del desarrollo en ella del foco inicial de la combustión. La duración de la fase inicial  $\theta_I$  correspondientemente crece y el proceso de combustión se hace menos estable, incrementándose la desuniformidad de los ciclos separados. En cierta medida ayuda el enriquecimiento de la mezcla hasta obtener valores de  $\alpha = (0,8 \dots 0,85)$ , para los cuales tiene lugar un encendido más seguro por la chispa. Pero inclusive en este caso, por lo general, no se logra evitar el prolongamiento de la combustión en considerable parte de la carrera de expansión y garantizar el encendido sin intermitencias a grandes ángulos de avance, cuando las presiones de compresión son aún muy pequeñas.

El desarrollo no satisfactorio de la combustión en los regímenes de pequeñas cargas y la necesidad en este caso del enriquecimiento de la mezcla constituyen una de las principales desventajas de los motores a gasolina de encendido por chispa que conducen al inútil consumo excesivo de combustible y a expulsar al

medio ambiente, junto con los gases quemados, considerables cantidades de monóxido de carbono  $CO$  e hidrocarburos  $C_xH_y$  de la combustión incompleta.

### 1.1.3 Relación de compresión

Cuando aumenta la relación de compresión  $\varepsilon$ , las presiones y temperaturas de la mezcla de trabajo hacia el instante que salta la chispa se elevan y disminuyen la concentración de los gases residuales. Simultáneamente se crean condiciones más favorables para la ignición de la mezcla por la chispa, se reduce la duración de la fase inicial de combustión; aumentan los límites del empobrecimiento posible de la mezcla.

Las elevadas presiones y temperaturas de la mezcla comprimida también contribuyen a la elevación de las velocidades de combustión en la fase principal, pero al mismo tiempo a elevadas  $\varepsilon$  se incrementa la relación de la superficie de la cámara de combustión con respecto a su volumen, como consecuencia de lo cual crece la cantidad relativa de la mezcla que se encuentra en las capas cercanas a las paredes y en los expulsadores, es decir, se incrementa la fracción de la mezcla que quema en la tercera fase. Todo esto en su conjunto conduce a que en los motores con elevados  $\varepsilon$  disminuyen los ángulos óptimos de avance al encendido (correspondientes a la máxima potencia), Se reduce la duración de la combustión hasta el instante en que alcanza la máxima presión (el punto  $P_{m\acute{a}x}$  se acerca al PMS), pero simultáneamente con esto disminuye el coeficiente de desprendimiento de calor activo en los puntos  $P_{m\acute{a}x}$  y  $T_{m\acute{a}x}$ , crece el valor relativo de los procesos de combustión residual en la tercera fase.

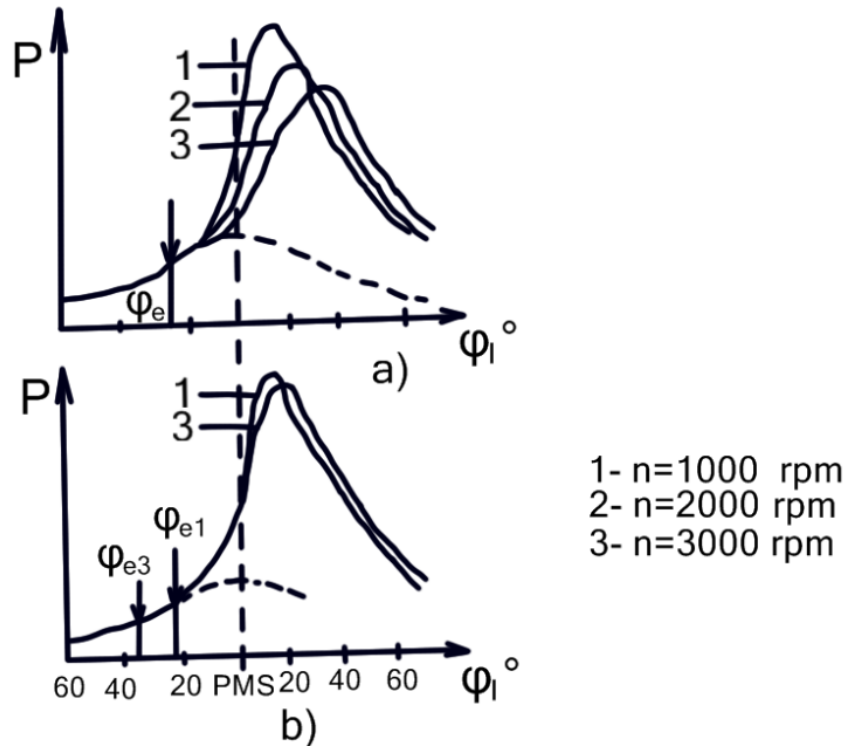
### 1.1.4 Frecuencia de rotación.

Al aumentar la frecuencia de rotación del cigüeñal del motor. el tiempo reservado al desarrollo del proceso de combustión disminuye y al mismo tiempo se incrementa la intensidad de la turbulencia de la carga de trabajo. Por lo expuesto, como ya se anotó, la velocidad con que se propaga el frente de la llama en la fase principal de combustión crece aproximadamente proporcional a la frecuencia de rotación, mientras que la duración de la fase principal  $\theta_{II}$ , expresada en grados de rotación del cigüeñal, por lo general, permanece constante. La duración de la fase inicial de la combustión  $\theta_I$  se incrementa con el crecimiento de la frecuencia de rotación.

Si aumentamos la frecuencia de rotación  $n$ , manteniendo constantes la composición de la mezcla y el ángulo  $\varphi_e$ , entonces podrá observarse un desarrollo cada vez más tardío del proceso de combustión por ciclo (figura 6,a). Con el correspondiente aumento del ángulo  $\varphi_e$  puede conseguirse que las líneas de crecimiento de la presión en la fase principal de combustión para diversos

valores de  $n$  prácticamente coincidirán (figura 6,b). Al elevar la frecuencia de rotación se incrementa un tanto la duración de la fase de combustión residual  $\theta_{III}$ , pero la disminución de la efectividad del desprendimiento de calor vinculada con esto, se compensa por la disminución de la transferencia de calor a las paredes; debido a la reducción del tiempo que los gases con elevadas temperaturas se encuentran en el cilindro.

Figura 6. Diagrama indicado de presión a diferentes velocidades.



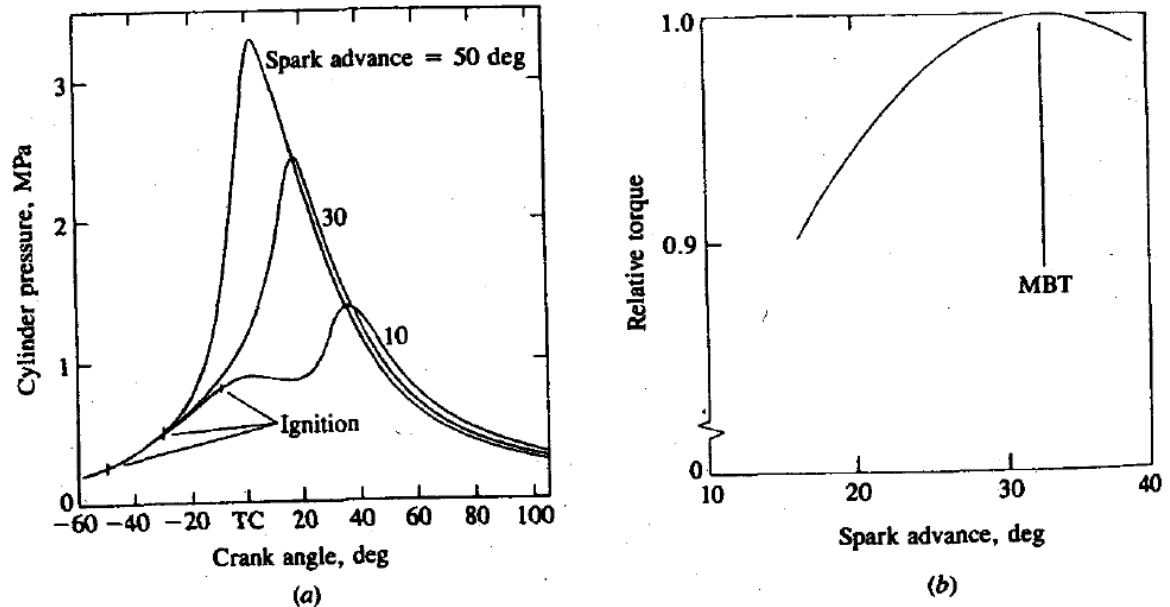
Ibíd., p. 34.

#### 1.1.5 Avance del encendido.

En la figura 7 se muestra como la variación en avance del encendido respecto al punto muerto superior afecta el desarrollo de la presión en el cilindro de los motores de encendido por chispa. Si la combustión empieza muy rápido en el ciclo, el trabajo transferido del pistón a los gases en el cilindro al final de la carrera de compresión es muy alto; si la combustión empieza muy tarde, la presión pico del cilindro se reduce y la carrera de expansión el trabajo de los gases al pistón decrece. Hay un avance de la chispa particular en el cual brinda el máximo par del motor a una velocidad fija, composición de la mezcla y tasa de flujo. Se refiere al avance MBT (máximo brake torque). Este avance también proporciona la máxima potencia al freno y el mínimo consumo de combustible.



Figura 7. Presión en el cilindro en función del ángulo de avance del encendido.



HEYWOOD, John B., Internal Combustion Engine Fundamentals. McGraw – Hill. Nueva York, 1988. p. 374.

#### 1.1.6 Forma de la cámara de combustión.

La turbulencia de la carga de trabajo en el cilindro, suscitada por el ingreso de la mezcla a través de secciones de paso relativamente estrechas en los órganos de la distribución de los gases (válvulas, conductos de admisión), puede ser adicionalmente reforzada gracias al traspaso de mezcla desde el cilindro a la cámara de combustión; las formas más adecuada de huecos relativamente angostos entre la superficie inferior de la culata y la cara del pistón, se denominan expulsadores.

Los expulsadores se disponen de tal manera que permitan crear turbulencia adicional a la carga en aquellas zonas hasta las cuales el frente de la llama llega desde la bujía en último turno. Con esto se consigue la aceleración de la combustión residual. La bujía se coloca de manera que no origine demasiada turbulencia cerca de ella y, al mismo tiempo, que se garantice buen barrido respecto a los gases residuales en la zona de la bujía, dirigiendo hacia ella por parte del flujo de la mezcla que entra a través de la válvula de admisión.

Cuanto más cerca del centro de la cámara de combustión se instale la bujía, tanto más corto será el camino recorrido por el frente de llama hasta los puntos más alejados. Al colocar la bujía en la parte central se obtiene la mayor superficie del frente de la llama, en consecuencia, la velocidad de crecimiento de la presión resultan más altas que cuando la bujía está situada al costado. Es indispensable,

sin embargo, considerar que esto se refiere solamente a las cámaras de combustión que tienen forma simétrica. La creación de expulsadores puede influir más sobre la velocidad de combustión que la disposición de la bujía.

Sin embargo, siendo la superficie de los expulsores grande, la parte relativa de la mezcla no quemada que se enfría intensamente y está encerrada en angostas ranuras entre la culata y la cara del pistón, resulta ser bastante considerable, lo que puede conducir a una notable disminución del coeficiente activo de desprendimiento de calor en el punto  $P_{m\acute{a}x}$  y, por lo tanto, a la disminución del trabajo útil del ciclo. Es por esta razón que la superficie de los expulsadores generalmente no sobrepasa el 30% - 40% de la superficie del pistón.

Entre las principales medidas empleadas para mejorar el proceso de combustión en los motores de combustible ligero y disminuir su toxicidad, figuran las siguientes:

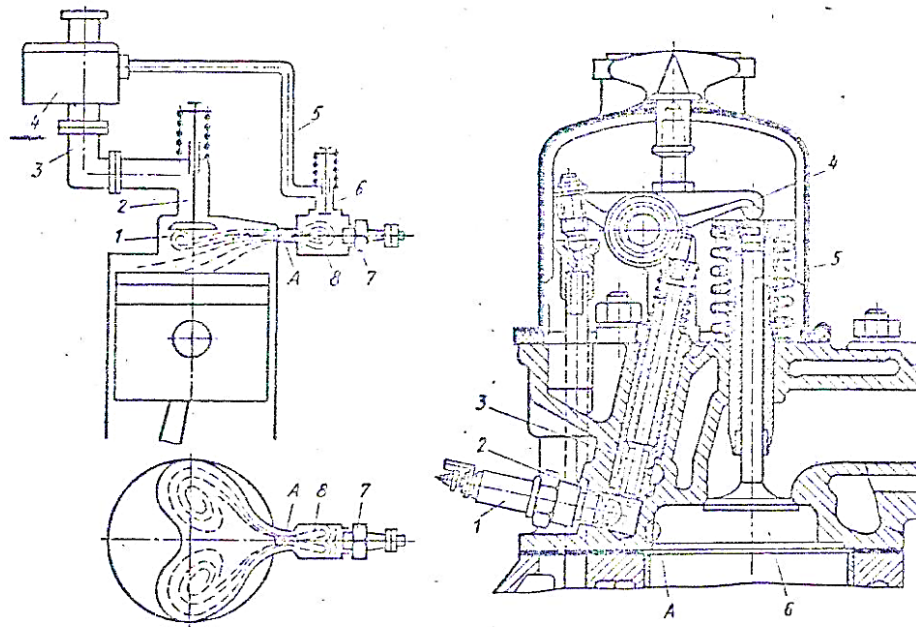
- La intensificación del encendido por chispa empleando circuitos o transistores, lo que permite ampliar un poco los límites del empobrecimiento efectivo de la mezcla al funcionar a pequeñas cargas y en los regímenes transitorios, disminuir el consumo de combustibles y la expulsión de los gases  $CO$  y  $C_xH_y$ .
- La creación de turbulencia de la carga de trabajo en los cilindros, utilizando estructuras de conductos de admisión que aseguren la dirección tangencial o en espiral del movimiento de la mezcla, lo que reduce la duración de la combustión y mejora el grado de uniformidad de ciclos consecutivos.
- La estratificación de la carga de trabajo de tal manera que en la zona de la bujía se concentre la mezcla más rica, en tanto que a medida de alejarse de la bujía la misma se empobrezca. Esto se consigue inyectando gasolina a la cámara de combustión al final de la carrera de compresión y organizando el movimiento respectivo del torbellino de aire. El mismo efecto puede lograrse empleando la entrada por separado de la mezcla rica y pobre al cilindro (inclusive hasta aire puro).

Sin embargo, en las cámaras de una sola cavidad es difícil garantizar las condiciones óptimas de semejante estratificación en una amplia zona de variación de los regímenes de velocidad y de carga.

Los mejores resultados se logran utilizando cámaras separadas con encendido por dardo. En ellas la bujía está instalada en una antecámara de pequeño volumen, dotada de una válvula adicional a través de la cual se efectúa su soplado con una mezcla fuertemente enriquecida  $\alpha_2$  (figura 8). En la cámara principal la mezcla se enciende por los chorros de las llamas de gases activos, arrojados por las toberas de la cámara pequeña lo que asegura la efectiva utilización de mezclas empobrecidas considerablemente ( $\alpha_1 \geq 1,5$ ) en caso de cargas parciales. Al

mismo tiempo en los regímenes de trabajo principales, en los gases de escape el contenido de  $CO$  constituye fracciones pequeñas y sustancialmente disminuye durante la combustión la formación de  $NO_x$ . Sin embargo, para las más pequeñas cargas y en vacío en los gases de escape aumenta la cantidad de  $C_xH_y$ .

Figura 8. Antecámara de combustión.



ROMERO, Carlos Alberto. Termodinámica de los M.C.I. Pereira.: Universidad Tecnológica de Pereira, 1990. p. 38.

## 1.2 PRINCIPALES ALTERACIONES DE LA COMBUSTIÓN NORMAL EN LOS MOTORES DE ENCENDIDO POR CHISPA

### 1.2.1 Detonación.

Externamente la detonación se revela durante el funcionamiento del motor a grandes cargas en la aparición del golpeteo metálico estridente, que es resultado de repercusiones periódicas múltiples sobre las paredes de la cámara de combustión de ondas de choque que se forman en los gases. Al suceder esto, al final de la combustión se registran vibraciones de la presión en forma de toda una serie de agudos picos que van gradualmente amortiguándose y que pueden observarse en los diagramas indicados (figura 9).

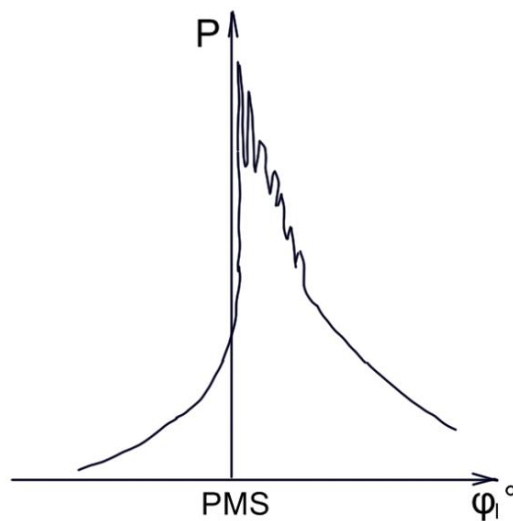
La frecuencia de estas vibraciones de la presión es igual a la frecuencia principal del golpeteo audible. Ella depende de las velocidades de propagación de las

ondas de choque y del camino recorrido entre las reflexiones consecutivas desde las paredes, que está determinado por las dimensiones del cilindro (principalmente por su diámetro).

Cuando la detonación es débil el golpeteo no surge en cada ciclo de trabajo, la amplitud de las vibraciones de presión es pequeña, alcanza apenas unos cuantos porcentajes de  $P_z$ , y las velocidades medias de propagación de las ondas de choque en los productos de la combustión oscilan entre los límites de  $1\,000\text{ m/s} - 2\,000\text{ m/s}$ .

Siendo el diámetro del cilindro de  $100\text{ mm}$ , la frecuencia de las vibraciones es aproximadamente igual a  $5\,000\text{ Hz}$ . Cuando la detonación es intensa, el fuerte golpeteo con frecuencia un poco mayor surge en cada ciclo, disminuyendo al mismo tiempo la potencia del motor y apareciendo humo negro en los gases de escape.

Figura 9. Diagrama indicado de presión cuando se presenta golpeteo.



Ibíd., p. 41.

El trabajo prolongado del motor con detonación es estrictamente intolerable, puesto que cuando surgen las ondas de choque crece bruscamente la emisión de calor desde los gases quemados hacia las paredes, lo que puede conducir al recalentamiento del motor y a la destrucción (se puede quemar las aristas de los pistones, las juntas entre los cilindros y la culata, los electrodos de las bujías). El carácter vibratorio de la carga sobre el émbolo cuando hay detonación puede suscitar la destrucción de la capa antifricción de los cojinetes de las bielas. El desgaste de la parte superior de la camisa del cilindro también aumenta, ya que

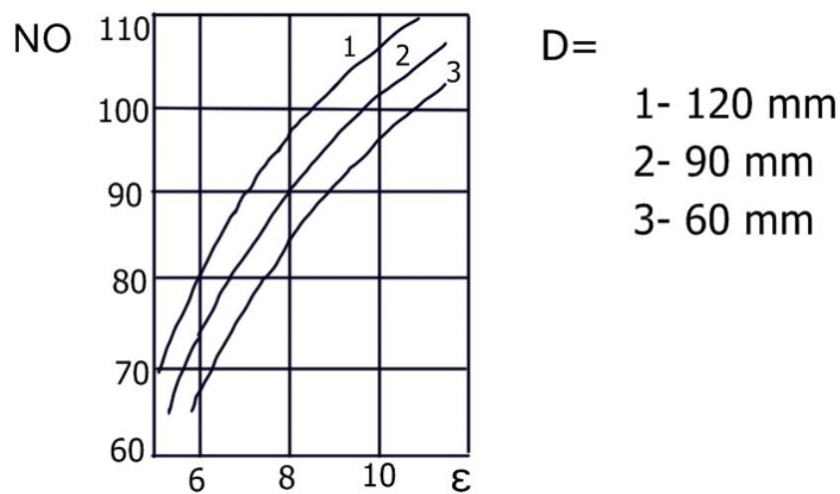
las ondas de choque destruyen la película de aceite que cubre la superficie metálica, como resultado de lo cual surge fricción seca y simultáneamente se refuerza el desgaste corrosivo bajo la acción de los elementos activos que contienen los productos de combustión, en particular los óxidos de nitrógeno.

La detonación se produce por el autoencendido de la carga de trabajo más alejada de la bujía, hasta la cual el frente de la llama llega desde la misma en último turno.

Las últimas porciones de la mezcla no quemada se comprimen hasta la presión  $P_z$  y, si esta compresión es adiabática, entonces su temperatura puede alcanzar

valores de  $T_c = T_a (P_z/P_a)^{\frac{k-1}{k}}$ , que sobrepasan en mucho la temperatura de autoencendido, incluso de los combustibles de elevado octanaje. Así por ejemplo, para:  $T_a = 340\text{ K}$ ,  $P_a = 0,085\text{ MPa}$ ,  $P_z = 4\text{ MPa}$  y el valor medio del exponente adiabático de la mezcla no quemada  $k = 1,34$ , su temperatura alcanza 900 K.

Figura 10. Octanaje requerido de la gasolina en función de la relación de compresión.



Ibíd., p. 41.

A la aparición de la detonación contribuyen todos aquellos factores que incrementan la velocidad del desarrollo de las reacciones que transcurren delante del frente de la llama en la última parte de la carga, a saber:

- Elevada capacidad de reacción del combustible, cuanto mayor sea esta capacidad tanto menor será el número de octano.
- Aumento de la relación de compresión que origina la elevación de la presión y temperatura en la última parte de la carga. Una función media estadística

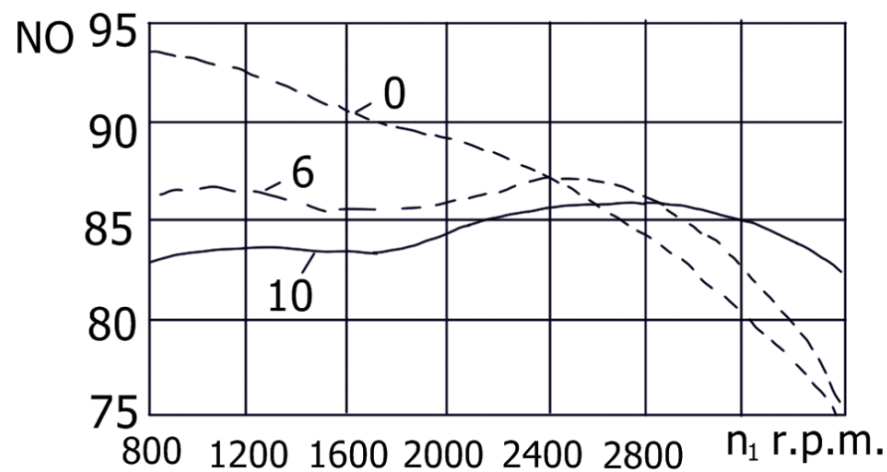
aproximada entre los valores tolerables, para los cuales aparece la detonación audible, y los números de octano de la gasolina se ilustra en la figura 10.

c. Aumento del ángulo de avance del encendido, en caso del cual la máxima presión  $P_z$  se obtiene cuando el pistón está más cerca del PMS y correspondientemente se elevan los valores de  $P_z$  y  $T_z$ .

d. Composición de la mezcla ( $\alpha \cong 0,9$ ), correspondiente a las presiones y temperaturas de combustión más elevadas, así como las máximas velocidades en que se desarrollan las reacciones que tienen lugar delante del frente de la llama en las mezclas calentadas por compresión.

e. Malas condiciones de enfriamiento de las últimas partes de la carga y el diseño inapropiado de la cámara de combustión que contribuyen a la lenta combustión residual.

Figura 11. Octanaje requerido de la gasolina en función de la frecuencia de giro.



Ibíd., p. 46.

Los factores que impiden el surgimiento de la detonación son aquellos que aceleran la combustión de la última parte de la carga en el frente de la llama o que mediante cualquier otro procedimiento dificultan la aparición de la autoinflamación explosiva, capaces de originar la formación de ondas de choque.

La influencia de la frecuencia de rotación del cigüeñal sobre la detonación depende de las propiedades de las gasolinas utilizadas.

Para el caso de hidrocarburos parafínicos y nafténicos, que se caracterizan por su inflamación bietápica y por poseer baja sensibilidad a las temperaturas, la tendencia del motor a detonar paulatinamente disminuye a medida que se incrementa la frecuencia de rotación.

Pero para el caso de las gasolinas modernas de alto octanaje para automóviles, que se destacan por su alto contenido de hidrocarburos aromáticos y, por lo tanto, poseen elevada sensibilidad a las temperaturas, la tendencia que tienen los motores a la detonación prácticamente no depende de la frecuencia de rotación (figura 11).

La tendencia a la detonación de los motores, siendo iguales la frecuencia de rotación y duración de la combustión, es considerablemente más débil en aquellos que tienen menores dimensiones de los cilindros. Esto se explica por ser menores los volúmenes de las porciones residuales de la mezcla no quemada, en las cuales no es tan probable el surgimiento de la autoinflamación del tipo explosivo.

### 1.2.2 Autoencendido prematuro

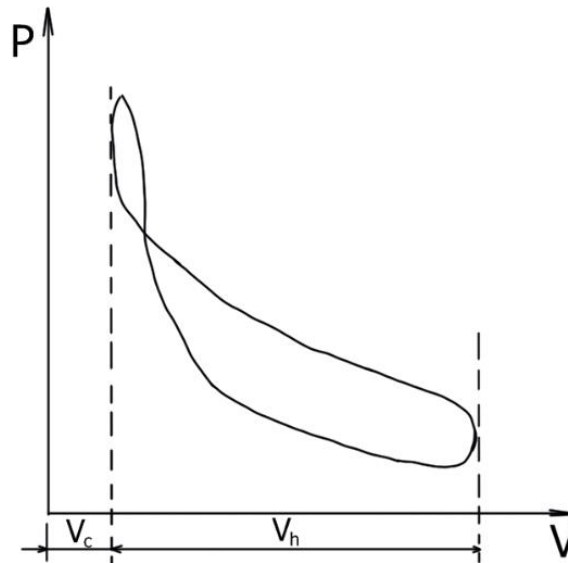
Las piezas que están fuertemente recalentadas en la cámara de combustión del motor (electrodos centrales y aisladores de las bujías, cabezas de las válvulas de escape), si sus temperaturas sobrepasan ciertos límites (700 °C – 800 °C), pueden provocar el autoencendido prematuro de la mezcla de trabajo o el denominado encendido por incandescencia antes de que salte la chispa. Como fuentes de dicho fenómeno pueden servir también las partículas grandes incandescentes (ardientes) de carbonilla.

Desde las superficies incandescentes el frente de la llama se propaga de manera análoga al de la llama proveniente de la chispa de la bujía, pero el instante de ignición resulta en este caso incontrolado.

Si el encendido por incandescencia surge lo suficientemente temprano durante la carrera de compresión, entonces la potencia del motor disminuye por efecto del consumo adicional de trabajo de compresión de los gases ya quemados y del aumento de la emisión calórica. Los diagramas indicados para el caso de este fenómeno, tienen la forma mostrada en la figura 12.

El encendido anticipado es la anomalía de la combustión más peligrosa en los motores de encendido por chispa, ya que origina el incremento muy brusco del traspaso de calor a las paredes a consecuencia de la elevación de  $P_z$  y  $T_z$ , puesto que los gases que ya tuvieron tiempo de quemarse son adicionalmente comprimidos por el émbolo y el tiempo de contacto de los gases quemados con las paredes aumenta considerablemente. Esto conduce al rápido autorreforzamiento del encendido por incandescencia, es decir, Este aparece cada vez con mayor anticipación durante la carrera de compresión, a causa de lo cual pueden quemarse (fundirse) los pistones. El peligro del encendido anticipado se acrecienta porque externamente éste por lo general se manifiesta sólo en forma de golpes secos, que no siempre se logra descubrir entre el conjunto de ruidos al funcionar el motor a elevadas cargas. Puesto que el encendido por incandescencia surge generalmente sólo en uno de los cilindros, la disminución total de la potencia de un motor multicilíndrico es insignificante.

Figura 12. Diagrama indicado de autoencendido prematuro.



Ibíd., p. 48.

Las fuentes del encendido anticipado que con mayor frecuencia se presentan son los electrodos centrales recalentados y las campanas de los aisladores de las bujías. Por eso es indispensable seleccionar las bujías en estricta correspondencia con las particularidades del motor. Dichas bujías deberán poseer suficientemente elevado “grado térmico”, que caracteriza la resistencia de la bujía contra el recalentamiento y, al mismo tiempo, no deberán ser excesivamente “frías”, o sea, la temperatura de los electrodos centrales de las bujías cuando el motor funciona en vacío no tendrá que ser menor de 400 °C, para evitar la formación de residuos carbónicos propios de la combustión.

### 1.2.3 Autoencendido retrasado.

En los motores a gasolina de automóviles con altas relaciones de compresión, especialmente al funcionar con combustibles que tienen aditivos antidetonantes, en la parte no quemada de la carga pueden originarse focos de encendido por incandescencia, después de comenzar la propagación del frente de la llama desde la chispa de la bujía. Las fuentes de semejante inflamación son las partículas de carbonilla incandescente (ardiente) que se desprenden de las paredes y se encuentran suspendidas en la carga de trabajo. Dichas partículas se depositan en las cámaras de combustión cuando el motor trabaja durante prolongado tiempo en regímenes de carga muy pequeñas y en vacío, pero se separan de las paredes al incrementar la carga.

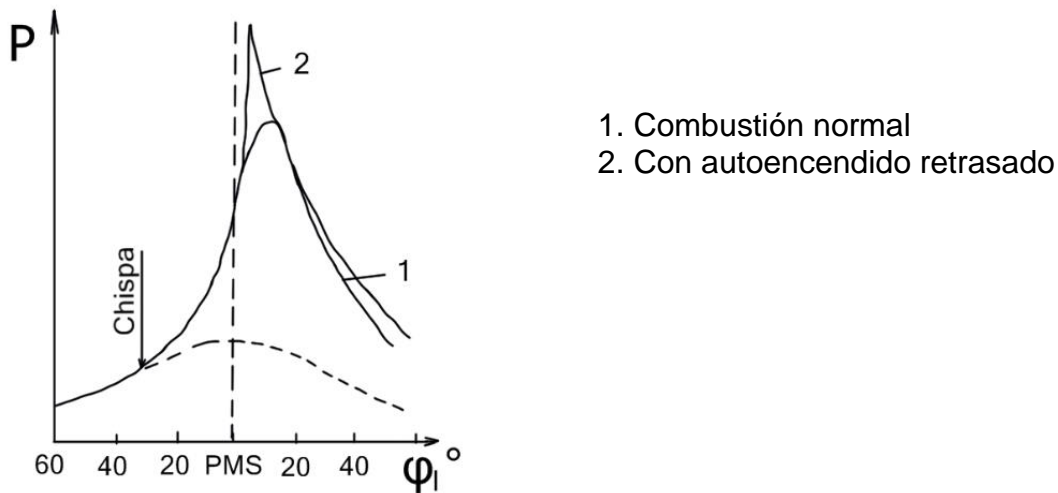
Desde estas partículas incandescentes comienzan a propagarse frentes de llama adicionales y la velocidad de combustión bruscamente aumenta al final de la fase



principal. Los tramos de los diagramas indicados, correspondientes a la culminación de la combustión, tienen forma de picos agudos (figura 13), se elevan las presiones máximas  $P_z$  y especialmente los valores de  $\partial p / \partial \varphi$ , que pueden alcanzar  $1,0 \text{ MPa/}^\circ$ , mientras que para la combustión normal constituyen  $0,2 \text{ MPa/}^\circ$ .

Semejante alteración de la combustión en los motores a gasolina, que en la literatura extranjera han obtenido la denominación de “rumble” (estrépito, estruendo), es característica para los automóviles con motores de gran cilindrada y, por lo tanto, con gran reserva de potencia, los cuales en condiciones de ciudad, considerable parte de su tiempo funcionan con cargas muy pequeñas.

Figura 13. Diagrama indicado de autoencendido retrasado.



Ibíd., p. 51.

#### 1.2.4 Autoencendido por compresión estando el sistema de ignición desconectado.

Semejante inflamación aparece con cierta frecuencia en los motores modernos para automóvil y consiste en que éstos continúan a veces durante un tiempo suficientemente largo trabajando en vacío después de desconectar el sistema de ignición. Este fenómeno se explica a veces equivocadamente como si fuera encendido por incandescencia, a pesar de que no tiene nada en común con este último.

Siendo la relación de compresión lo suficiente elevada ( $\epsilon > 8$ ), al girar el cigüeñal de un motor normalmente calentado, cuya mariposa de gases está casi cerrada (correspondiente al régimen de funcionamiento en vacío) la temperatura de la mezcla carburante al final del proceso de compresión alcanza valores lo suficiente alto como para que pueda producirse la autoinflamación de la mezcla a baja frecuencia de rotación ( $n = 300 \dots 400 \text{ rpm}$ ).

El procedimiento radical para eliminar este fenómeno consiste en que simultáneamente con la desconexión de la ignición, deberá tener lugar la interrupción automática del suministro de combustible a través del sistema de vacío.

### 1.3 CARACTERÍSTICAS DE REGULACIÓN

Se denominan características de regulación del motor a las gráficas que relacionan la potencia y la economía del motor, en función del coeficiente de exceso de aire (composición de la mezcla), el ángulo de avance de la inyección o del encendido, la cantidad de gases de escape recirculados (posición de la válvula de recirculación de los gases de escape), la temperatura del agua o el aceite, y otros factores susceptibles de regulación en el motor. Estas características sirven para descubrir las condiciones óptimas de trabajo del motor en función de los parámetros anotados y para valorar la perfección de las regulaciones.

Figura 14. Característica de regulación de un motor a gasolina en función del consumo de combustible,  $G_c$ .

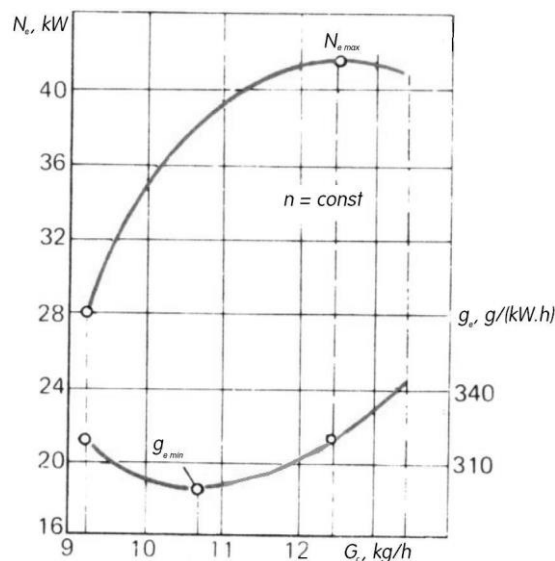
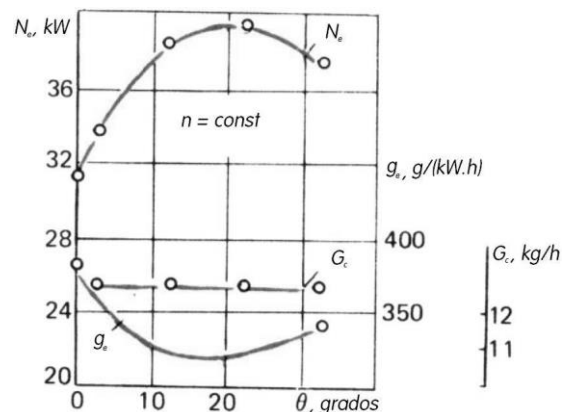


Figura 15. Característica de regulación de un motor a gasolina en función del ángulo de avance de la chispa,  $\theta$ .



ROMERO, Carlos Alberto. Motores de combustión interna fundamentos de construcción y cálculo. Pereira.: Universidad Tecnológica de Pereira, 2009. p. 86.

Las características de regulación generalmente anteceden a las características principales del motor. Las más frecuentes son las de regulación según el consumo

de combustible (o la composición de la mezcla) y según el ángulo de avance de la inyección o del encendido, para revoluciones constantes del cigüeñal.

En la característica de regulación de la figura 14 se ve que hay dos puntos extremos: uno que corresponde a la potencia máxima y otro que corresponde al mínimo consumo específico de combustible. En la práctica, para los motores convencionales, se adopta una regulación intermedia entre estos dos puntos. En los motores con inyección, en los que la unidad electrónica de control puede alterar simultáneamente varios parámetros (la cantidad de combustible, el ángulo de avance, la válvula RGE), las características de regulación son funciones complejas, obtenidas a partir de modelos de control.

Dentro de las características de regulación pueden incluirse las características de detonación, en las cuales se grafica el octanaje requerido del combustible para que un motor trabaje sin detonación de manera fiable, para diferentes ángulos de avance de la chispa, diferentes composiciones de la mezcla y otros factores.

#### 1.4 MODOS DE CONTROL EN LOS SISTEMAS ELECTRÓNICOS

El sistema de control del motor (SCM) debe responsabilizarse de la alimentación de combustible y el encendido en todas las condiciones de operación. Para esto debe determinar el modo de operación, partiendo de los datos de los sensores utilizados, y llamar a la rutina particular correspondiente del software.

En un motor característico hay siete modos de operación diferentes que afectan el control de combustible, a saber: arranque del motor, calentamiento del motor, control de lazo abierto, control de lazo cerrado, aceleración brusca, desaceleración y marcha mínima.

Cuando se da arranque al motor, el SCM se establece en modo de arranque para proveer una relación baja de aire/combustible. Una vez que las revoluciones suben por encima de las revoluciones de arranque, el controlador identifica el modo de control de arranque y pasa el control al programa correspondiente al modo de calentamiento. Este modo de operación mantiene la relación aire combustible baja para prevenir la parada del motor si el tiempo es frío, hasta que la temperatura del agua sube por encima de algún valor mínimo, que es particular para cada sistema dosificador de combustible.

Cuando la temperatura del agua sube, la lógica de control de modo pone el sistema a operar en lazo abierto mientras pasa cierto tiempo y el sensor EGO se calienta suficientemente para dar lecturas exactas. Esta condición es detectada monitoreando la salida de voltaje del sensor EGO, y verificando que la salida, por lo menos una vez, indicó mezcla rica y que el motor ha estado en lazo abierto por un tiempo específico. Luego que esto ha pasado el SCM selecciona el modo de lazo cerrado en el que el motor se queda hasta que pase cierto tiempo o se da una

aceleración o desaceleración brusca. Si el sensor EGO se enfría, la lógica de modo de control selecciona de nuevo el modo de lazo abierto.

Durante una aceleración brusca o una carga pesada el SCM elige un esquema que provee una mezcla aire/combustible rica durante la duración del régimen dado. Este esquema arroja máximo momento torsor pero relativamente malas prestaciones de toxicidad y economía. Después que ha pasado la necesidad de enriquecimiento, el sistema retorna al lazo abierto o al lazo cerrado, dependiendo de las condiciones de selección de la lógica del modo de control que existen a ese momento.

Durante los períodos de desaceleración la relación aire/combustible se incrementa para reducir las emisiones de HC y CO debidas al combustible en exceso no quemado.

Cuando se presenta el trabajo en vacío, la lógica del modo de control pasa el SCM al modo de marcha en vacío. La velocidad del motor es controlada para reducir la vibración y la inestabilidad que pueden ocurrir por la puesta en marcha del aire acondicionado, el alternador, la fricción propia del régimen o la posible puesta en marcha del vehículo.

### 1.5 ARRANQUE Y CALENTAMIENTO DEL MOTOR

En el arranque el SCM debe proporcionar una relación aire/combustible comprendida entre 2/1 y 12/1, dependiendo de la temperatura del motor. Las bajas temperaturas reducen la habilidad del combustible para mezclarse con el aire.

El computador lee la temperatura del motor por medio de un convertidor que recibe la señal del sensor de temperatura instalado en la camisa por donde circula el agua de enfriamiento. Una tabla de verificación es utilizada para determinar la apropiada relación aire/combustible a la temperatura dada. Mientras el motor esté en calentamiento el SCM debe enviar mezcla enriquecida a los cilindros, pero la relación aire/combustible varía a medida que sube la temperatura. El SCM permanece en modo de lazo abierto. El énfasis en este modo de control se hace en el calentamiento rápido y suave. La economía de combustible y el control de emisiones aun juegan un papel secundario en el calentamiento del motor.

## 2. OPERACIÓN DE LOS SISTEMAS DE ENCENDIDO, ELEMENTOS DE MODELADO Y DIAGNOSTICO

### 2.1 SISTEMA DE ENCENDIDO

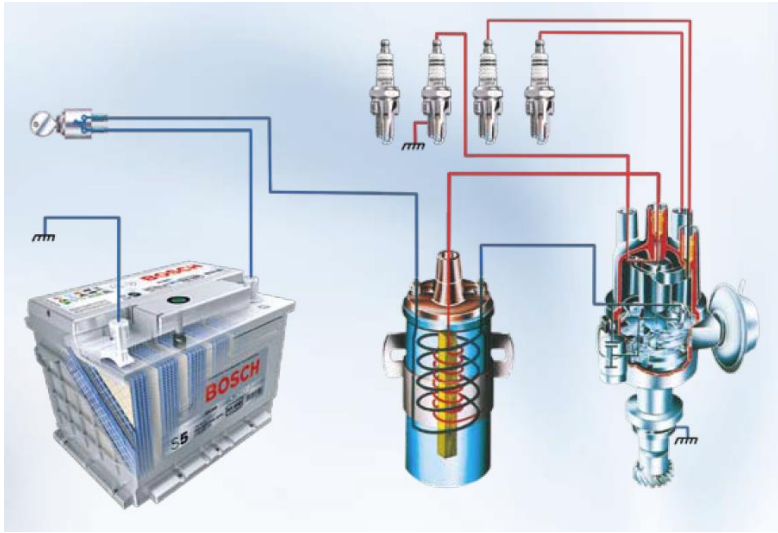
Los motores de combustión interna, necesitan para su funcionamiento un sistema capaz de encender la mezcla de aire y combustible que se introduce y comprime en el interior de sus cilindros. Esto se puede lograr por medio de un arco voltaico o chispa eléctrica que se hace saltar en la bujía de encendido, que suministre no menos de 200 mJ para inflamar la mezcla, iniciándose así la combustión. En los sistemas de encendido con arco voltaico se deben proveer por lo menos 4000 voltios para que se produzca una chispa entre los electrodos de una bujía. Se requiere de un elemento tipo transformador para elevar el voltaje de la fuente primaria, magneto o batería y de un sistema que genera la alternancia o el corte del circuito primario del transformador. Este elemento puede ser un interruptor mecánico o un interruptor electrónico sincronizado con el cigüeñal, mediante un sensor de posición que puede ser inductivo, óptico o de efecto Hall. La rapidez de aparición del voltaje secundario puede aumentarse implementando sistemas de descarga capacitiva. Los sistemas de encendido electrónico pueden tener una o más fuentes de alto voltaje, como en los sistemas sin distribuidor o sistemas DIS. Cualquiera que sea el sistema de encendido, éste debe garantizar que el inicio de la inflamación de la mezcla puede variarse en función de la carga, las revoluciones y las condiciones de operación. El conjunto de elementos que participan en la obtención de dicha chispa se denomina "CIRCUITO DE ENCENDIDO".

El circuito de encendido convencional consta de:

- Batería
- Llave de contacto
- Bobina
- Distribuidor
- Cables de bajo y alto voltaje
- Bujías

Los sistemas de encendido eléctrico tienen algunas desventajas entre las cuales están el "relativamente elevado" tiempo de respuesta y las limitaciones para quemar mezclas pobres, requiriendo que la mezcla aire-combustible apropiada se localice muy cerca de la bujía. Se están desarrollando actualmente sistemas de encendido por plasma de radiofrecuencia. Estos sistemas tienen un resonador de cavidad coaxial de un cuarto de onda Q, que sirve como un amplificador de campo eléctrico y como dispositivo de descarga y puede operar en rango de frecuencias de 800 a 1500 MHz. Los sistemas de encendido por plasma pueden producir una gran energía de inflamación, suficiente para quemar de forma fiable bajo cualquier régimen de carga, mezclas pobres o estratificadas. La introducción de resonancia molecular aporta ventajas adicionales.

Figura 16. Circuito de encendido convencional.



BOSCH, catalogo, 2009.

Los antiguos sistemas de encendido utilizaban unos contactos que abrían y cerraban un circuito. A estos elementos se les conocían como platinos y tenían un condensador para permitir el corte instantáneo de corriente.

Con la aparición y desarrollo de los dispositivos semiconductores se comenzó una carrera de "electronificación" del sistema de encendido que lo ha convertido en la actualidad en uno de los sistemas con menor posibilidad de fallo y más larga vida del automóvil, además de ser absolutamente libre de mantenimiento. Todavía en algunos modelos de automóviles se conserva el distribuidor, pero hay una marcada tendencia a su desaparición.

En el sistema clásico el contacto tiene que manejar plenamente la corriente del primario de la bobina de encendido. Esta corriente es muy alta, pero como el contacto la interrumpe miles de veces por minuto, el pequeño chisporroteo que se produce al abrir el contacto termina desgastándolo. Poco después de que el transistor era un dispositivo semiconductor terminado y confiable, comenzó a utilizarse para alargar en mucho la vida de los contactos y reducir la posibilidad de fallo.

Por otro lado para sustituir el contacto se necesitaba algún dispositivo que pudiera conectar y desconectar la corriente de base del transistor de manera brusca (como un pulso eléctrico) ya que éste se encarga del resto del trabajo y para lograr esto los fabricantes se decidieron por diferentes alternativas:

- Método foto-electrónico
- Método de inducción
- Método a efecto hall

Luego aparecieron los sistemas DIS (Distributorless Ignition System) los cuales se caracterizan por la eliminación del distribuidor rotatorio de alta tensión. Estos encendidos también son conocidos como encendidos electrónicos integrales.

La distribución de alta tensión se logra comúnmente con el empleo de bobinas gobernadas por un módulo electrónico, el cual recibe principalmente las señales del captador del punto muerto superior, del número de revoluciones y del grado de carga.

## 2.2 TRABAJO DEL SISTEMA DE ENCENDIDO CONVENCIONAL

La corriente que pasa por el devanado primario de la bobina, crea alrededor de los hilos, un campo de fuerza magnético. Al abrir los contactos, la corriente en el circuito primario desaparece, el campo de fuerza magnético, bruscamente se reduce y cortando los hilos de las bobinas primaria y secundaria, induce en ellas una f.e.m. proporcional al número de hilos. En el devanado secundario la f.e.m. alcanza 12 000 V – 24 000 V, y en el primario: 200 V – 300 V. Cuanto más rápidamente las líneas magnéticas corten los hilos de los devanados (es decir, cuanto más rápidamente desaparezca el campo magnético), tanto mayor será la f.e.m. inducida en ellos. La f.e.m. inducida en el devanado primario recibe el nombre de f.e.m. de autoinducción. Esta tiende a mantener la corriente que desapareció y con consiguiente, a desacelerar la reducción del campo magnético. Además, esta f.e.m. provoca chispas entre los platinos (cuando están separados). Para no permitir estos fenómenos se cuenta con el condensador. En el momento inicial de separación de los platinos, la corriente de autoinducción carga el condensador, lo que reduce el paso de corriente entre los contactos y las chispas entre ellos. Después, el condensador se descarga a través del devanado primario de la bobina de encendido y además, la corriente de descarga está dirigida contra la corriente de autoinducción, gracias a lo cual la desaparición de la corriente en el circuito primario transcurre más rápidamente y por consiguiente, más rápidamente se reduce el campo magnético. Si no existiera el condensador, entonces la desaparición del campo magnético de fuerza, transcurriría comparativamente lento y la f.e.m. en el devanado secundario no superaría 4 000 V – 5000 V.

Es muy importante la elección correcta de la capacitancia del condensador. Si la capacitancia es grande, las chispas entre los platinos serán insignificantes, pero aumenta el tiempo de carga y descarga del condensador, lo que disminuirá la f.e.m. inducida en el devanado secundario. Si la capacitancia es pequeña, habrá "chisporreo" excesivo entre los platinos y la f.e.m. en el devanado primario de la bobina, también se disminuirá.

En el sistema mostrado en la figura 16, la capacitancia del condensador debe ser de 0.20  $\mu\text{F}$  – 0.25  $\mu\text{F}$  (microfaradios).

### 2.3 TRANSFERENCIA DE CALOR DURANTE EL PROCESO DE ENCENDIDO

En los motores de encendido por chispa, la descarga eléctrica producida entre los electrodos de la bujía por el sistema de encendido empieza el proceso de combustión cerca del final de la carrera de compresión. La alta temperatura del foco de llama creado por la chispa se convierte en un auto sostenible y propagador frente de llama, una lámina delgada de reacción donde ocurre una reacción química de combustión exotérmica. La función del sistema de encendido es iniciar el proceso de propagación de llama, de una manera repetible ciclo-a-ciclo, en todas las cargas y rangos de velocidades del motor en el punto apropiado del ciclo del motor.

La figura 17 muestra el comportamiento de la descarga de voltaje y corriente en función del tiempo de un sistema de encendido convencional. Los valores típicos están mostrados; los valores reales dependen de los detalles de los componentes eléctricos. La fase de ruptura está caracterizada por un alto voltaje ( $\sim 10$  kV), alto pico de corriente ( $\sim 200$  A), y una sumamente corta duración ( $\sim 10$  ns). Un estrecho canal cilíndrico de gas ionizado se establece muy pronto (diámetro  $\sim 40$   $\mu$ m). La energía suministrada se transfiere casi sin pérdidas a esta columna de plasma. La temperatura y presión en la columna se eleva muy rápido a valores cercanos a  $60\,000$  K y unos pocos cientos de atmosferas, respectivamente. Una fuerte onda o explosión se propaga hacia el exterior, el canal se expande, y, como resultado, la temperatura y presión del plasma caen.

Las caídas de tensión en los electrodos del cátodo y del ánodo son una fracción importante del arco voltaico, y la energía depositada en las cubiertas de estos electrodos, las cuales son expulsadas por los electrodos metálicos, son una fracción importante de la energía total del arco. Este requiere un punto caliente del cátodo, para que la evaporación del material ocurra. Debido a esta transferencia de energía la temperatura del gas en el arco está limitada a  $6\,000$  K; la temperatura y el grado de disociación decrece rápidamente cuando se incrementa la distancia del eje del arco. Corrientes menores a  $200$  mA, una gran caída de voltaje en el electrodo del cátodo ( $300$  V a  $500$  V), un cátodo frío, y menos de  $0,01\%$  ionizado son típicos para el resplandor de la descarga. Las pérdidas de energía son más altas que en la fase del arco, y alcanza la temperatura pico de equilibrio del gas cerca de  $3\,000$  K.

Cerca de  $0,2$  mJ de energía es requerida para encender una mezcla de aire y combustible estequiométrica en reposo en condiciones normales del motor por medio de una chispa. Fundamentalmente para mezclas más magras y ricas, y donde la mezcla fluye por los electrodos, un orden mayor de magnitud de energía ( $\sim 3$  mJ) puede ser necesaria. Sistemas de encendido convencionales entregan  $30$  mJ a  $50$  mJ de energía eléctrica a la chispa. Debido a las características físicas de los modos de la descarga discutidos atrás, solo una fracción de la energía suministrada a la bujía es transmitida a la mezcla de gas. El balance de energía de la ruptura, arco y la fase del resplandor de la descarga se da en la tabla 1. Las



pérdidas por radiación son pequeñas a lo largo del proceso. El final de la ruptura ocurre cuando se crea un punto caliente en el cátodo, convirtiendo la descarga en un arco; las pérdidas de calor a los electrodos entonces se convierten importantes. La fase de ruptura alcanza su nivel de potencia más alto ( $\sim 1$  MW), pero la energía suministrada es pequeña ( $0,3$  mJ a  $1$  mJ). El resplandor de la descarga tiene el nivel de potencia más bajo ( $\sim 10$  W) pero la energía más alta ( $30$  mJ a  $100$  mJ), debido a su largo tiempo de descarga. La fase del arco se encuentra en el medio.

Tabla 1. Distribución de energía en la fase de ruptura, arco y resplandor de la descarga.

	Ruptura [%]	Arco [%]	Resplandor [%]
Pérdida por radiación	<1	5	<1
Pérdidas de calor a los electrodos	5	45	70
Pérdidas totales	6	50	70
Energía de plasma	94	50	30

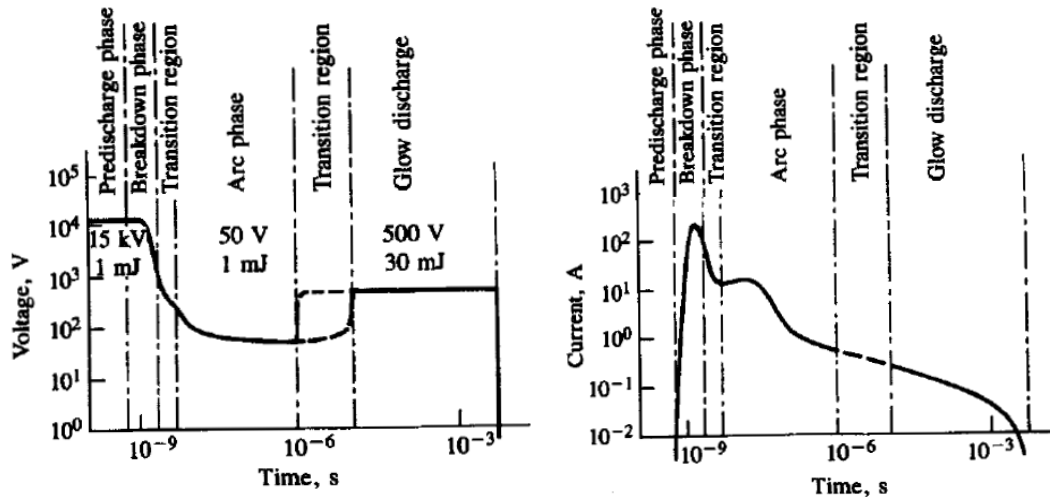
Las porciones de energía eléctrica suministrada, las cuales pueden ser transferidas al plasma en estas tres fases de la descarga, se muestran en la figura 18. Las diferentes capacidades de transferencia para la ruptura, el arco y el resplandor de la descarga surgen principalmente de las diferencias en pérdidas de calor a los electrodos, como se explicó antes. Estas pérdidas incrementan con el incremento de energía suministrada. En el arco y en el resplandor de la descarga, aumento ya sea en tiempo de descarga o en corriente de descarga (o en ambos) siempre conduce a importantes decrementos de la eficiencia de transferencia de energía.

Si la corriente del resplandor de la descarga es incrementado por encima de aproximadamente  $100$  mA, la descarga cambia al modo de arco y dará como resultado una fuerte erosión del electrodo. Así hay límites prácticos para la corriente de descarga del arco y del resplandor; también, el tiempo disponible para el encendido en el motor limita incremento de tiempo de descarga.

En la figura 19 se muestra la variación de la temperatura en función del ángulo de giro del cigüeñal, y la variación del flujo de calor calculado de ella, medido en la culata de un motor de encendido provocado en condiciones de operación de carga parcial y a bajas velocidades. La oscilación de la temperatura en la superficie en este punto (cerca de la mitad desde el eje de la bujía en el cilindro a la pared del mismo) es  $7$  K. El flujo de calor se eleva rápidamente cuando la llama llega a la localización del punto de medición, tiene su máximo cerca del momento del pico de presión en el cilindro cuando la temperatura alcanza su pico, y luego decae a bajos niveles relativos, alrededor de  $60$  grados después del punto muerto superior ya que la expansión enfría los gases quemados. El flujo de calor pico en la culata

es de  $1,5 \text{ MW/m}^2$  a  $3 \text{ MW/m}^2$ , fue medido dentro de la velocidad y rango de carga de un motor normal.

Figura 17. Variación de voltaje y corriente de un sistema de encendido convencional.

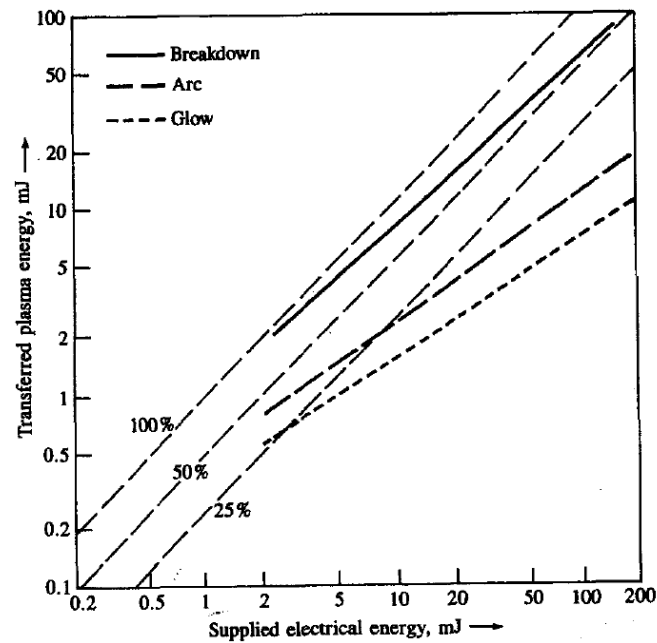


HEYWOOD, John B., Internal Combustion Engine Fundamentals. McGraw – Hill. Nueva York, 1988. p. 428.

El perfil del flujo de calor varía significativamente con el lugar de medición y de un ciclo al siguiente. La figura 19 ilustra ambos de estos efectos. Cuando ocurre el aumento rápido del flujo de calor depende del tiempo de llegada de la llama al lugar de medición. Así el flujo de calor determinado del valor promedio de muchos ciclos de la temperatura de la superficie muestra su rápido aumento después, cuanto mayor sea la distancia desde la ubicación de la bujía (figura 20,a). La información de cada ciclo individual en la figura 20,b muestra como variaciones del tiempo de llegada de la llama de un ciclo al siguiente esencialmente desplaza la porción ascendente del perfil del flujo de calor en el tiempo. Note que debido a estas variaciones del ciclo, el perfil promedio muestra una menos rápida elevación del flujo de calor que en ciclos individuales.

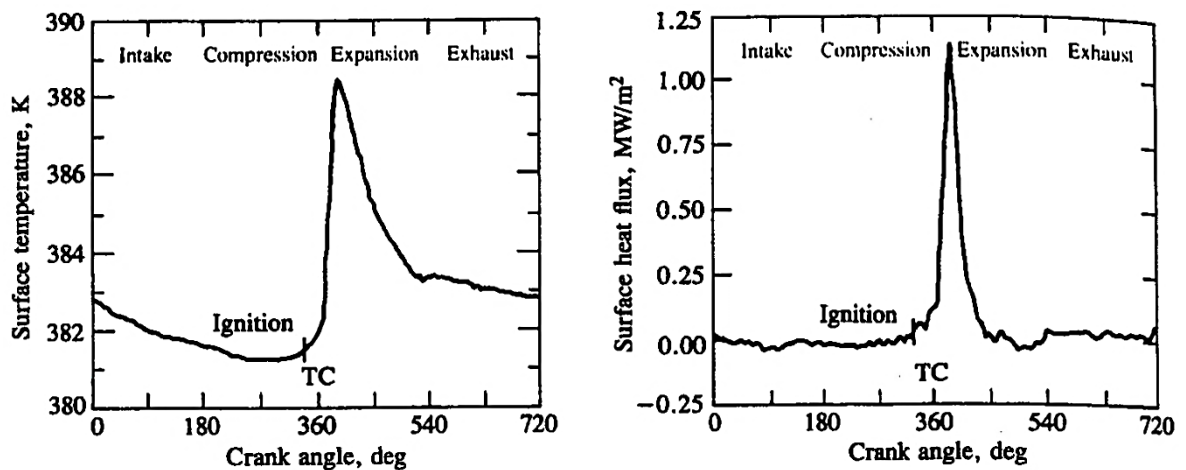
Dicha medición muestra que incrementando la velocidad del motor e incrementando la carga, incrementa la superficie de transferencia de calor. El tiempo de retardo retrasa el aumento del flujo de calor y reduce el valor pico. El máximo flujo de calor ocurre con mezclas cerca a estequiometrias. Todas estas tendencias se esperarían de la variación de temperatura de los gases quemados que resultan de estos cambios de la operación del motor.

Figura 18. Energía transferida al núcleo de la llama en función de la energía eléctrica suministrada.



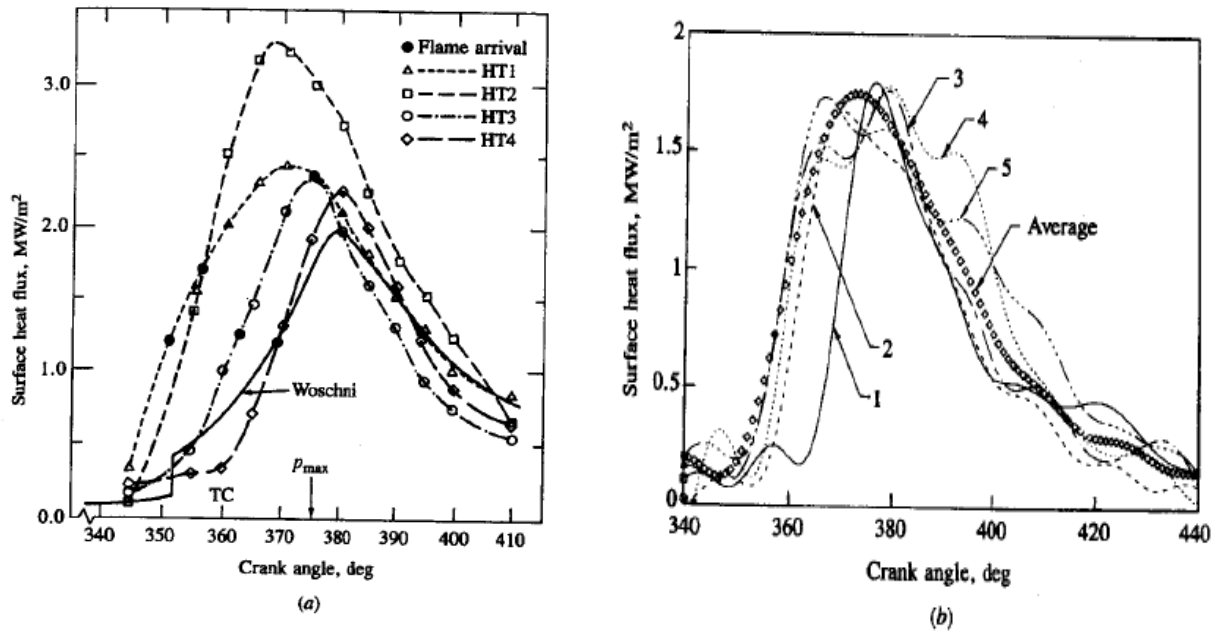
HEYWOOD, John B., Internal Combustion Engine Fundamentals. McGraw – Hill. Nueva York, 1988. P. 430.

Figura 19. Temperatura y flujo de calor promedio en el proceso de encendido.



HEYWOOD, John B., Internal Combustion Engine Fundamentals. McGraw – Hill. Nueva York, 1988. p. 690.

Figura 20. Flujo de calor en función del ángulo de giro.



a) Variación de la superficie de flujo de calor con el ángulo del cigüeñal en cuatro lugares de medición de temperatura en la culata de un motor de encendido por chispa. Cada curva es un promedio de muchos ciclos. Las distancias al eje de la bujía son: HT1: 18,7 mm; HT2: 27,5 mm; HT3: 37,3 mm; HT4: 46,3 mm.

b) Diagramas de flujo de calor para cinco ciclos individuales y el promedio de 198 ciclos medidos en el lugar de HT1.

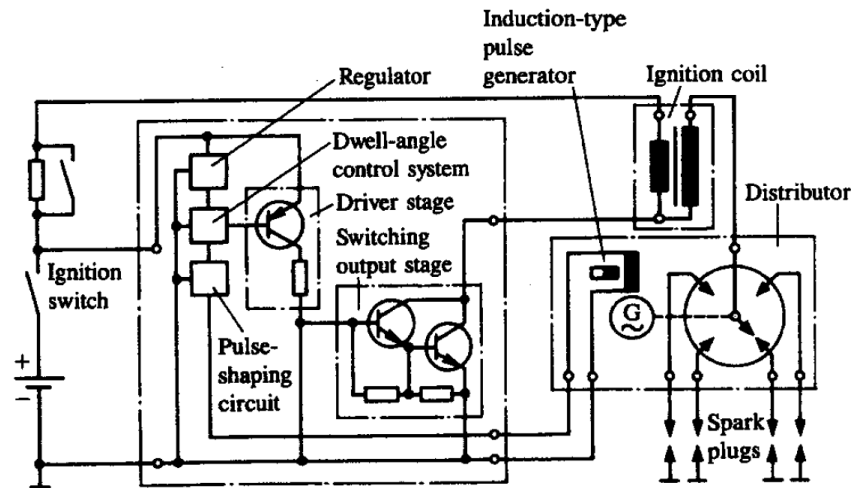
HEYWOOD, John B., Internal Combustion Engine Fundamentals. McGraw – Hill. Nueva York, 1988. p. 691.

## 2.4 DESCRIPCIÓN Y PARTICULARIDADES DE OPERACIÓN DE LOS SISTEMAS DE ENCENDIDO

2.4.1 Sistema de encendido transistorizado. En aplicaciones automotrices, la necesidad de reducir el mantenimiento del sistema de encendido, extender la vida de las bujías, mejorar el encendido para mezclas pobres y diluidas, y aumentar la confiabilidad y vida útil, ha llevado al uso de sistemas de encendido con bobina la cual provee una salida de voltaje más alta y usa activación electrónica para mantener el tiempo requerido sin desgaste o ajuste. Son llamados encendidos transistorizados (TCI) o sistemas de encendido electrónico de alta energía. Se requiere una salida más alta de voltaje porque las bujías ahora son ajustadas a mayor distancia (gap – cerca de 1 mm) para extender la habilidad de encender la mezcla de combustible en un amplio rango de operación del motor, y porque durante el kilometraje extendido entre el cambio de la bujía, la erosión del

electrodo aumenta aún más la distancia (gap) entre estos. Ahora en las aplicaciones automotrices es provisto usualmente un voltaje disponible de 35 kV. En adición a un voltaje más alto, mayor duración de la chispa (cerca de 2 ms), se ha desarrollado este sistema para extender las condiciones de operación del motor sobre las cuales se alcanza un encendido satisfactorio.

Figura 21. Sistema de encendido transistorizado con un generador de pulsos inductivo.



HEYWOOD, John B., Internal Combustion Engine Fundamentals. McGraw – Hill. Nueva York, 1988. p. 440.

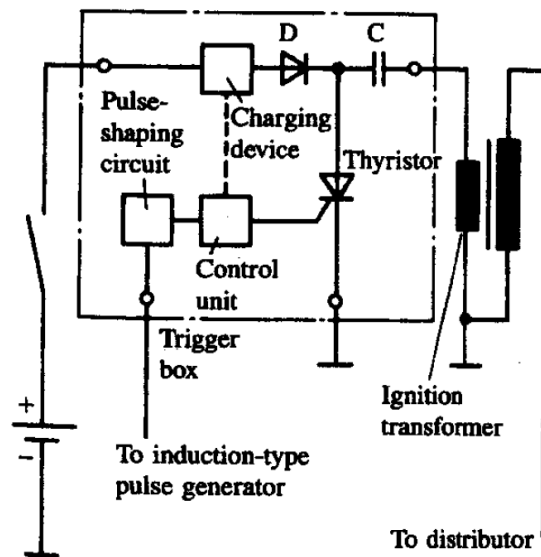
Ahora la mayoría de los sistemas de encendido de estado sólido en uso operan bajo el mismo principio. La figura 21 muestra el diagrama del circuito de bloques de un sistema de encendido transistorizado. El punto de distribución y el arreglo de la leva del sistema de encendido convencional son reemplazados por un sistema de generación de pulsos magnéticos el cual detecta la posición del eje del distribuidor y manda pulsos eléctricos a un módulo de control electrónico. El módulo corta el flujo de corriente al devanado primario de la bobina, induciendo un alto voltaje en el devanado secundario el cual distribuye a las bujías como en el sistema de interruptor convencional. El módulo de control contiene circuitos de temporización los cuales luego cierran el circuito primario para que la acumulación de la corriente primaria pueda ocurrir. Hay muchos tipos de generadores de pulso que pueden activar el circuito electrónico del sistema de encendido. Un generador de pulsos magnético, donde una rueda dentada de acero conducida por el eje del distribuidor gira y pasa por el polo estacionario del captador, se usa generalmente. El número de dientes del rotor es el mismo que el número de cilindros. Un campo magnético se provee por un imán permanente. Cuando pasa cada diente del rotor por el polo fijo se incrementa y luego decrece la fuerza del campo magnético  $\psi$  ligado con la bobina captadora, produciendo una señal de voltaje proporcional a  $d\psi/dt$ . El módulo de control corta la corriente de la bobina para producir la chispa

cuando el diente del rotor pasa a través del alineamiento y la bobina captadora de voltaje se invierte bruscamente y pasa a cero. La parte creciente de la forma de onda, después de esta inversión de voltaje, se usa por el modulo electrónico para estabilizar el punto en el cual la corriente de la bobina primaria es cortada para el siguiente pulso de encendido.

2.4.2 Sistema de encendido de descarga capacitiva. Con este tipo de sistema (mostrado en la figura 22) un condensador, más que una bobina de encendido, se usa para almacenar la energía del encendido. La capacitancia y el voltaje de carga del condensador determinan la cantidad de energía almacenada. El transformador de encendido intensifica la tensión primaria, generada en el momento de la chispa por la descarga del condensador a través del tiristor, en el alto voltaje requerido en la bujía. La caja de disparo (CDI) contiene el condensador, el interruptor de potencia por tiristores, el dispositivo de carga (para convertir el voltaje de la batería en el voltaje de carga de 300 V a 500 V por medio de pulsos a través de un transformador de voltaje), la unidad generadora de pulsos, y la unidad de control.

La ventaja principal del sistema CDI es su insensibilidad a derivaciones eléctricas en el circuito de encendido de alto voltaje que resulta de la suciedad en la bujía. Por la rápida descarga capacitiva, la chispa es fuerte pero corta (0,1 a 0,3 ms). Esto puede llevar a fallas del encendido en las condiciones de operación donde la mezcla es muy pobre o diluida.

Figura 22. Sistema de descarga capacitiva CDI.



Ibíd., p. 441.

## 2.5 CÁLCULO DEL SISTEMA DE ENCENDIDO CONVENCIONAL

Durante el trabajo del sistema de encendido por batería tiene lugar procesos electromagnéticos complejos, y es difícil encontrar las expresiones analíticas exactas para el cálculo de las características del sistema de encendido. Por esto al deducir las correlaciones de cálculo principales el sistema eléctrico real de encendido se representa con sistemas de reemplazo. Al componer los esquemas de reemplazo se hacen las siguientes asunciones:

El acople autotransformador entre los devanados primario y secundario de la bobina no se tiene en cuenta, es decir, la bobina se reemplaza por un devanado transformador con coeficiente de transformación igual a uno.

Los parámetros de los circuitos primario y secundario se toman invariantes (constantes).

El distribuidor de chispa se reemplaza por uno de fricción.

Las capacidades distribuidas del circuito secundario (bujías, conductores de alta tensión, piezas conductoras de corriente en el distribuidor devanado secundario) se reemplazan por una capacitancia concentrada  $C_2$ .

Se desprecia la influencia de corrientes parásitas y las fugas de corrientes a través de los aisladores.

Se asume que los contactos del distribuidor se separan instantáneamente y sin pérdida de energía.

El proceso de trabajo del sistema de encendido se puede dividir en tres etapas:

1. Conexión (cerrado) de los contactos del interruptor (platinos) y acumulación de energía en el campo magnético de la bobina.
2. Separación de los contactos e inducción de la tensión secundaria.
3. Transformación de la energía en descarga de chispa entre los electrodos de la bujía.

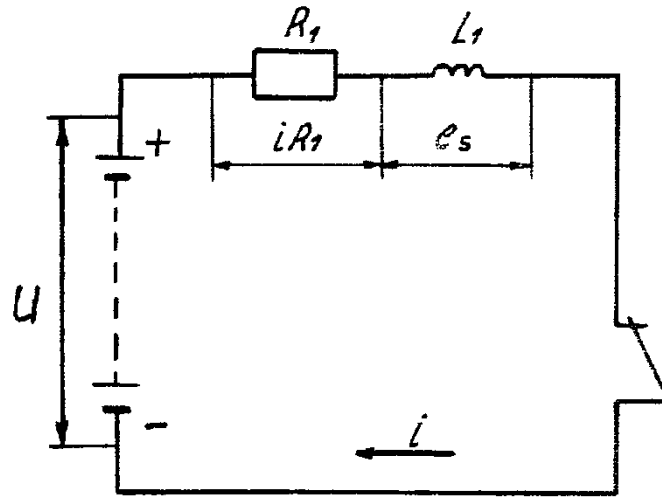
Al cerrarse los platinos, el circuito secundario puede considerarse abierto (figura 22) debido a que la capacitancia secundaria y la resistencia acoplada son muy grandes, mientras que la frecuencia de conmutación es comparativamente pequeña. Suponiendo, que al comienzo de cerrarse los platinos la corriente en el devanado primario es igual a cero, se puede escribir:

$$U = i_l R_l - e_s = i_l R_l + L_l \frac{d_i}{d_t}$$

Donde  $U$  - es la tensión aplicada al devanado primario.

$R_1$  y  $L_1$  son correspondientemente la resistencia activa y la inductancia del circuito primario.

Figura 23. Esquema sustitutivo del sistema de encendido después de cerrarse los platinos.



ROMERO, Carlos Alberto. Motores de combustión interna fundamentos de construcción y cálculo. Pereira.: Universidad Tecnológica de Pereira, 2009. p. 354.

Resolviendo esta ecuación, obtenemos:

$$i_1 = \frac{U_1}{R_1} \left[ 1 - e^{-(r_1 / L_1) t} \right]$$

Al inicio de la separación de los platinos la corriente en el primario alcanza el valor:

$$I_{tr} = \frac{U}{A_1} \left( 1 - e^{-\frac{R_1}{L_1} t} \right)$$

$$I_{tr} = \frac{U}{R_1} \left( 1 - e^{-\frac{R_1}{L_1} \frac{120}{Z_n} y_c} \right)$$

Aquí  $tr = T = (120/Z \cdot n_m)$  es el período o tiempo durante el cual los platinos se abren y se cierran; período de trabajo.

$n_m$  es la frecuencia de rotación del cigüeñal.

$Z$  es el número de cilindros del motor.



Como se ve, la corriente en el embobinado primario en el momento de apertura de los platinos disminuye con el aumento de la frecuencia de rotación del cigüeñal y el número de cilindros del motor. La corriente depende también de los parámetros del circuito primario, es decir, de la constante de tiempo  $T_1 = L_1/R_1$ .

En la Figura 24 se dan los oscilogramas de variación de la intensidad de la corriente a diferentes revoluciones del cigüeñal.

En la figura 25  $R_n$  es la resistencia equivalente de las pérdidas en el sistema;  $R_p$  es la resistencia que tiene en cuenta la carbonilla en el sistema de encendido;  $C_2$  es la capacitancia total del circuito secundario.

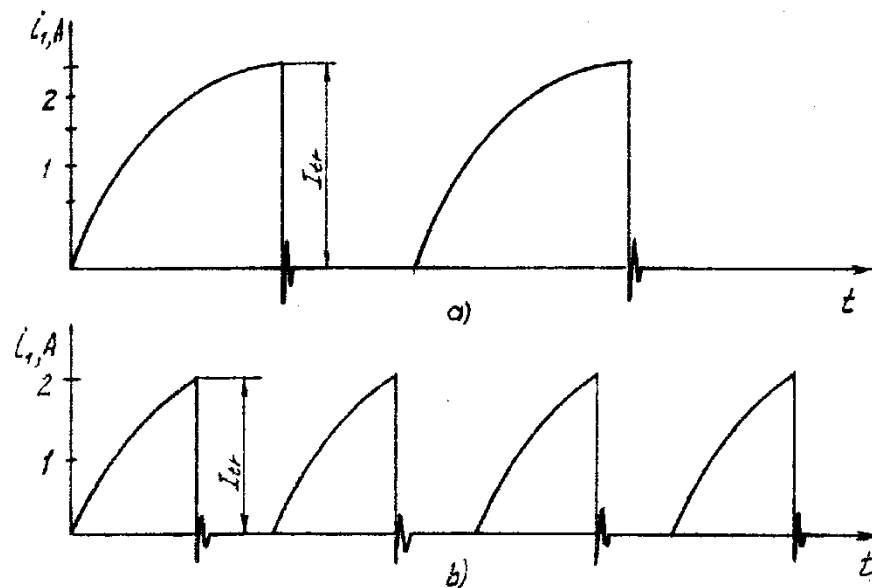
Al momento de apertura de los platinos en el campo magnético de la bobina se acumula energía:

$$W_M = I_r^2 \cdot L_1 / 2$$

En el embobinado secundario se induce una f.e.m.

$$e_2 = -K_T L_1 \frac{d_i}{d_t} = -K_T U e$$

Figura 24. Oscilogramas de la corriente primaria de la bobina de encendido a distintas frecuencias de rotación del motor. a)  $n_m=1000$  rpm; b)  $n_m=2000$  rpm



Ibíd., p. 355.

La f.e.m. alcanza un valor máximo en el momento de cerrado de los platinos (para  $t=0$ ) y es igual a  $U K_T$ .

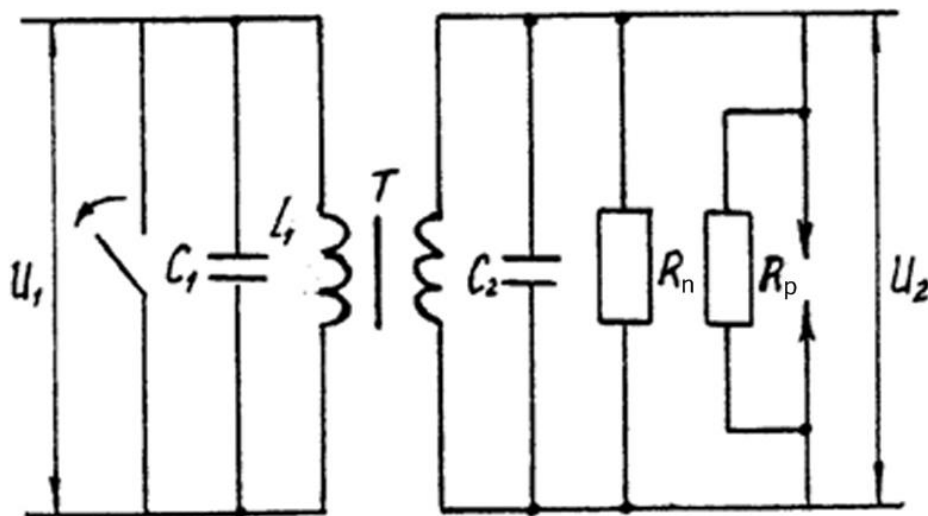
Para analizar los procesos que transcurren después de abrirse los contactos (segunda etapa), es cómodo utilizar el esquema sustitutivo mostrado en la figura 25. En el esquema no se muestra la batería, ya que su resistencia y la magnitud de la f.e.m. se puede despreciar. Como resultado el devanado primario de la bobina resulta estar cerrado por el condensador  $C_1$ .

El devanado secundario junto con la capacitancia  $C_2$  forma el segundo circuito oscilatorio ligado con el primero.

Al abrirse los contactos la intensidad de la corriente  $i$ , variará y en los circuitos surgirán auto-oscilaciones amortiguadas, acompañadas de la inducción de una f.e.m. y la recarga de los condensadores.

Es muy complejo describir exactamente los procesos oscilatorios y por eso, para la valoración de la magnitud de la tensión secundaria, puede utilizarse el balance de energía del proceso oscilatorio.

Figura 25. Esquema sustitutivo del sistema de encendido por batería después de abrirse los platinos (segunda etapa).



Ibíd., p. 356.

Supongamos que durante las auto-oscilaciones no tiene lugar el rompimiento del intervalo (entrehierro) de la bujía, entonces la corriente y la tensión en los circuitos oscilatorios primario y secundario variarán por la ley de las oscilaciones amortiguadas. Entonces la corriente  $i_1$ , del embobinado primario variará según una cosinusoide, y la tensión por una sinusoide (ver figura 26).

Cada cuarto de período siendo la corriente  $i_1 = 0$  toda la energía del campo magnético se transforma en energía del campo eléctrico de los condensadores  $C_1$  y  $C_2$ . Por consiguiente, en este momento las tensiones  $U_1$  y  $U_2$  alcanzarán los valores máximos. Sobre la base del balance de energía se puede escribir:

$$\frac{L_{1x} I_{tr}^2}{2} = \frac{C_1 U_{1m}^2}{2} + \frac{C_2 U_{2m}^2}{2} + W$$

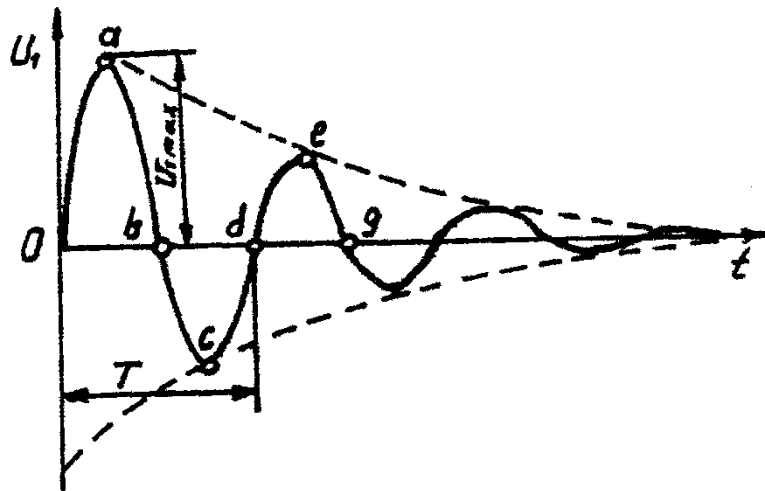
donde  $W$  son las pérdidas de energía en los circuitos oscilatorios.

En la figura 26 se representa la variación de la tensión  $U_1$  en función del tiempo para las siguientes cargas y descargas de las capacitancias  $C_1$  y  $C_2$ . o – a – carga inicial; a – b – descarga inicial; b – c y d – e – cargas siguientes; c – d y e – g – descargas seguidas.

La tensión en el embobinado primario se puede expresar de la siguiente manera:

$$U_{1m} = U_{2m}/K_T$$

Figura 26. Amortiguación de la tensión primaria.



Ibíd., p. 357.

Entonces la ecuación del balance de energía se puede expresar así:

$$I_{tr}^2 L_1 = \left[ C_1 \frac{I}{K_t^2} + C_2 \right] U_{2m}^2 + 2W$$

Resolviendo esta ecuación con respecto al valor máximo de la tensión secundaria, obtendremos:

$$U_{2m} = \frac{\sqrt{I_{tr}^2 L_1 - 2W}}{\frac{C_1}{K_t^2} + C_2}$$

Si se desprecian las pérdidas entonces

$$U_{2m} = I_{tr} k_t \frac{\sqrt{L_1}}{C_1 + K_t^2 C_2}$$

De esta ecuación queda claro que la tensión secundaria es proporcional a la corriente de ruptura, al coeficiente de transformación y a la inductancia del devanado primario y secundario de la bobina de encendido.

Al trabajar la bobina de encendido, en el aislante debido a la carbonilla se forman puentecillos conductores de la corriente que cortocircuitan el entrehierro de chispa. Esto se tiene en cuenta con la resistencia  $R_p$  cuya magnitud se encuentra en los límites  $(5...10) \cdot 10^5$  Ohmios. Las pérdidas complementarias de energía que así surgen disminuyen la tensión secundaria. Sobre la magnitud de la tensión secundaria, fuera de la resistencia  $R_p$  influyen también las pérdidas magnéticas, las pérdidas en el aislamiento (fugas de corriente a través del aislante). Las pérdidas en estos elementos se acostumbra tener en cuenta por la resistencia equivalente de pérdidas  $R_{sh}$  que ponen en serie con el entrehierro.

Teniendo en cuenta las pérdidas anotadas la magnitud máxima de la tensión secundaria se puede calcular aproximadamente por medio de la siguiente fórmula:

$$U_{2m} = I_{tr} K_t \sqrt{\frac{L_1}{C_1 + C_2 K_t^2}} n_1$$

$$\text{donde } n = e^{\left[ \frac{\arctg \sqrt{(4R_e^2 C_e - 1)/L_1}}{\sqrt{(4r_e^2 C_e - 1)/L_1}} \right]}$$

$n$ : Coeficiente de amortiguamiento.

$$R_e = \frac{R_p R_{sh}}{R_p + R_{sh}} \cdot \frac{1}{K_t^2}$$

$R_e$ : Resistencia equivalente de las pérdidas del sistema de encendido, referida al circuito primario;

$$C_e = C_1 + C_2 \cdot K_t^2$$

$C_e$ : Capacitancia equivalente.

Sobre la magnitud de la tensión secundaria influyen los siguientes parámetros: la corriente de ruptura  $I_{tr}$ , el coeficiente de transformación  $K_t$ , la capacitancia del circuito primario  $C_1$  y del circuito secundario  $C_2$ , la magnitud de la inductancia del devanado primario  $L_1$  y la resistencia equivalente de pérdidas.

De la fórmula anotada de la máxima tensión secundaria se concluye que es directamente proporcional a la corriente  $I_{tr}$ . Sin embargo tal dependencia se observa sólo durante el trabajo sin arco del interruptor. Siendo grande  $I_{tr}$ , debido a las pérdidas en el arco entre los contactos, a las pérdidas por fugas en el circuito secundario, el crecimiento de  $U_2$  se retarda.

La relación entre la máxima tensión secundaria y la corriente de ruptura se muestra en la figura 27.

Figura 27. Tensión secundaria en función de la corriente de desprendimiento.

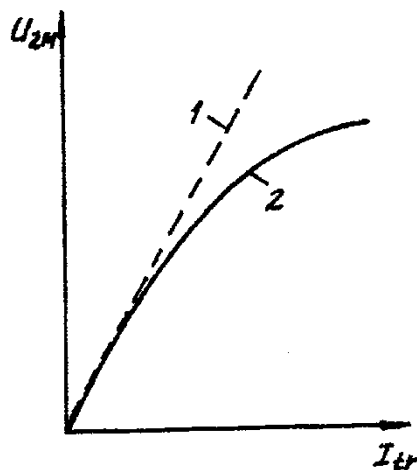
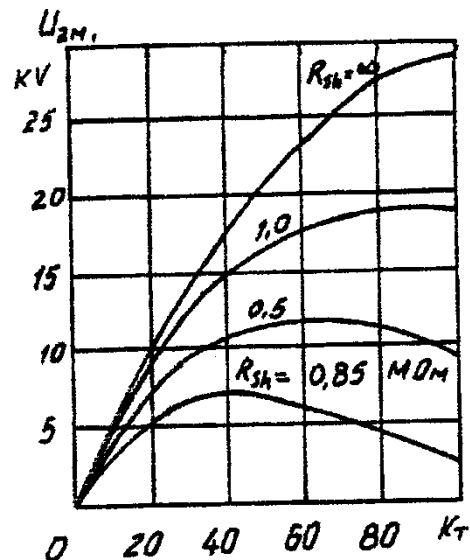


Figura 28. Influencia del coeficiente de transformación y la resistencia de shunt.



Ibíd., p. 360.

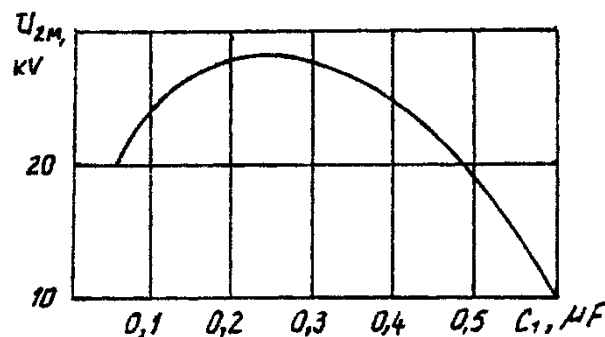
A muy bajas frecuencias del cigüeñal, cuando el período de conmutación de los contactos del interruptor  $T$  es mucho mayor que la constante  $T_1$  del circuito del

devanado primario de la bobina de encendido, la corriente primaria alcanza prácticamente el valor estabilizado  $I_{tr} = U/R_1$ . La tensión teórica  $U_{2m}$  a bajas revoluciones debe ser constante y la máxima. Sin embargo, debido a la formación de arco en los contactos del interruptor, lo cual se incrementa al disminuir las revoluciones del cigüeñal, la tensión secundaria es significativamente menor que la teórica (figura 27).

La influencia del coeficiente de transformación sobre la magnitud de la tensión secundaria depende de la magnitud de la resistencia shunt  $R_{sh}$ . Si no existen fugas ( $R_{sh} \approx \infty$ ), la magnitud  $U_{2m}$  aumenta al aumentar el coeficiente de transformación. Al disminuir la magnitud  $R_{sh}$  la dependencia  $U_{2m} = f(K_T)$  tiene un carácter no lineal. Es más, para cada valor  $R_{sh}$  se tiene un valor óptimo del coeficiente de transformación, para el cual  $U_{2m}$  alcanza su valor máximo (figura 28).

La tensión secundaria es proporcional a la inductancia del devanado primario, la cual influye también en la intensidad de la corriente de ruptura.

Figura 29. Influencia de la capacitancia  $C_1$  del condensador primario sobre la tensión de la bobina  $U_2$ .



Ibíd., p. 361.

Con el aumento de la inductancia disminuye la velocidad de crecimiento de la intensidad de la corriente en el devanado primario y de la intensidad de la corriente de ruptura. Sin embargo, no se debe disminuir demasiado la inductancia  $L_1$ , ya que se disminuye también la energía del campo magnético y la tensión secundaria. Con el aumento de las capacitancias primaria  $C_1$  y secundaria  $C_2$  debe disminuirse la tensión  $U_{2m}$ . Sin embargo, en realidad, teniendo en el circuito primario una capacitancia de magnitud determinada (0,25...0,35  $\mu F$ ) disminuyen las pérdidas de energía en la formación de arco al abrirse los contactos (platinos) y se incrementa la tensión secundaria. Con este fin el condensador primario generalmente se instala dentro o fuera del distribuidor. Es así el por qué con el

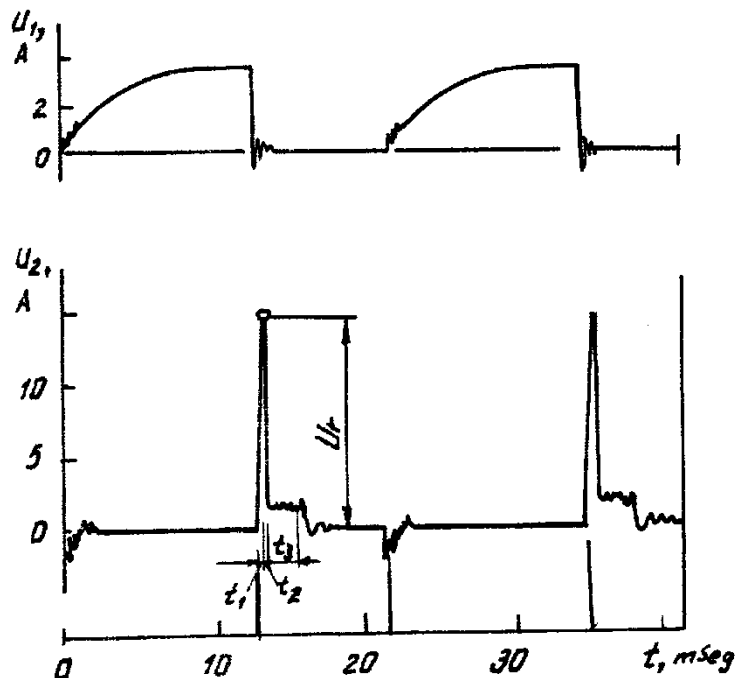
aumento de la capacitancia  $C_1$  del condensador la tensión de la bobina  $U_{2m}$  inicialmente crece y luego, habiendo alcanzado el valor máximo, disminuye (figura 29).

Debe anotarse, que los parámetros del circuito primario  $L_1$  y  $C_2$  se eligen pretendiendo obtener la energía electromagnética exigida y garantizar el trabajo sin chispas de los contactos del interruptor (platinos).

La disminución de la capacitancia  $C_1$  está limitada por la construcción y tecnología de fabricación de los elementos de alto voltaje. El apantallado o sellado del sistema de encendido provoca al aumento significativo de  $C_1$  y la disminución de  $U_{2m}$ .

Del análisis hecho se deduce que el sistema de encendido por batería tiene posibilidades limitadas para el aumento significativo de la tensión secundaria. Sus principales elementos constructivos alcanzan ya cierta perfección.

Figura 30. Variación de la corriente primaria  $I_1$  y de la tensión secundaria  $U_2$  al trabajar el sistema de encendido ( $t_1$  es el tiempo de crecimiento de la tensión secundaria hasta el momento de la ruptura;  $t_2$  es el tiempo de descarga capacitiva;  $t_3$  es el tiempo de descarga inductiva).



Ibíd., p. 363.

El proceso oscilatorio amortiguado de variación de la tensión secundaria tendría lugar si no se venciera la resistencia del entrehierro de la bujía. Pero en realidad la tensión secundaria desarrollada es mayor que la tensión de ruptura para la bujía, es decir,  $U_{2m} > U_r$ . Por consiguiente, siendo  $U_{2r} = U_r$  ocurrirá el rompimiento del entrehierro de la bujía y el proceso oscilatorio se afectará.

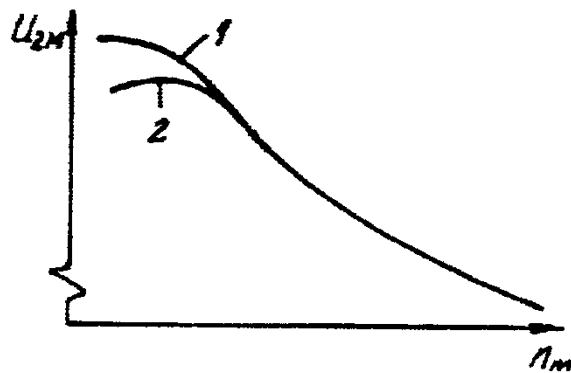
La descarga de chispa en la bujía, siendo el sistema de encendido por batería, es un proceso complejo que puede imaginarse compuesto de dos fases: capacitiva e inductiva (figura 30).

Los procesos de descarga eléctrica se encuentran ligados directamente con factores tan importantes para la práctica como la capacidad inflamativa de la chispa, la erosión de los electrodos de la bujía (determina el período de duración de la bujía), y las interferencias de radio.

La primera fase capacitiva de descarga (después de romper el entrehierro de la bujía) se caracteriza por elevadas corrientes de descarga, debido a que el entrehierro está fuertemente ionizado y su resistencia es pequeña. Las corrientes de descarga en este tiempo alcanzan varias decenas de amperios, pero transcurren en un intervalo muy corto de tiempo (fracciones de microsegundos). La velocidad de variación de la corriente alcanza cerca de  $50 \cdot 10^9$  A/s. La fase capacitiva de la descarga se puede observar como una brillante chispa azul clara.

La segunda fase inductiva de descarga, a cuenta de la energía residual, transcurre por el canal tendido y durante esto la corriente pasa ininterrumpidamente a través del entrehierro de chispa, fuertemente ionizado por la descarga capacitiva. La duración de esta fase alcanza varios milisegundos y la intensidad de la corriente se mide en decenas de miliamperios. La descarga continúa prácticamente hasta el consumo completo de la energía electromagnética.

Figura 31. Tensión  $U_{2m}$  creada por el sistema de encendido, en función de la frecuencia de rotación  $n_m$  del cigüeñal: 1- teórica 2- experimental.

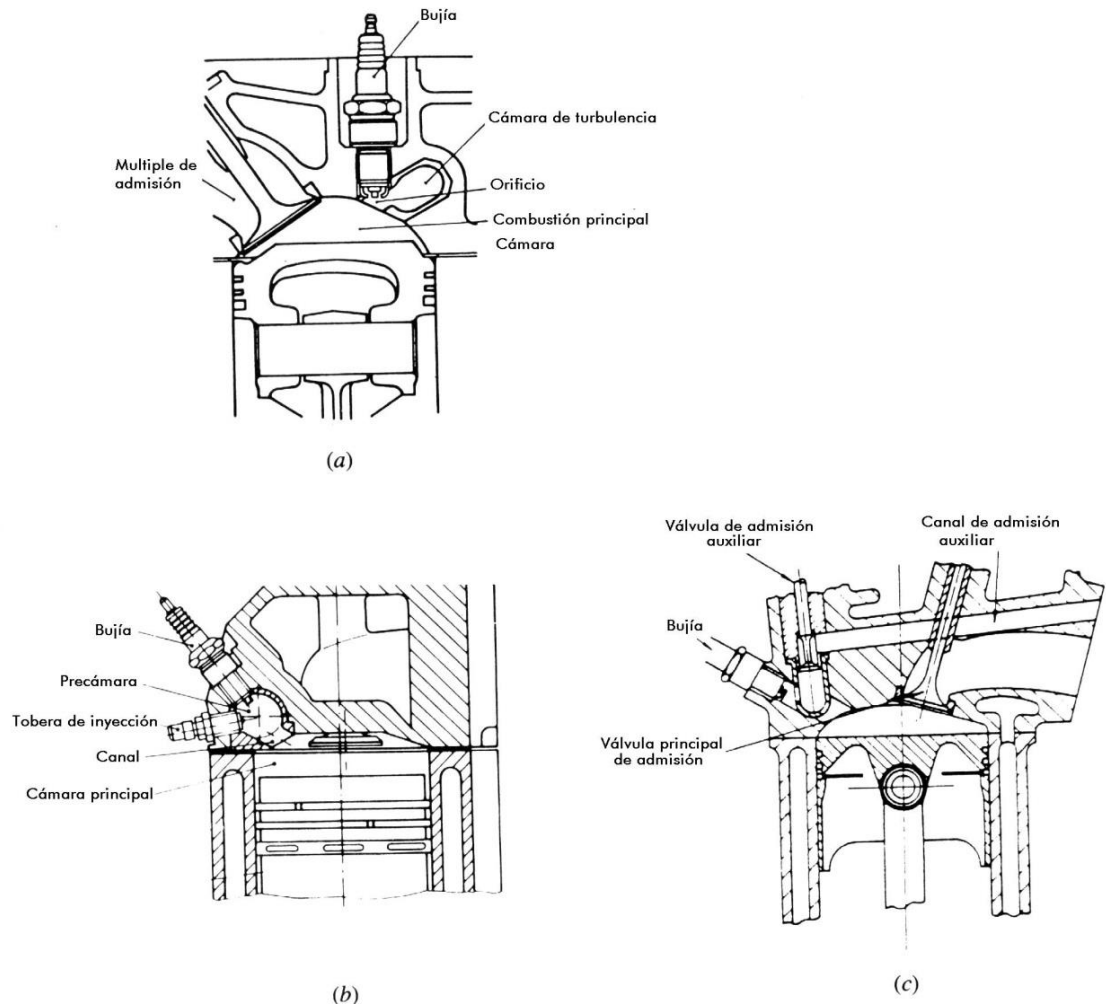


Ibíd., p. 364.



Siendo normal la magnitud de la tensión alimentadora, la energía de la fase capacitiva es igual a 5 mJ – 15 mJ. Generalmente la mezcla de combustible se inflama durante la fase capacitiva de la descarga de chispa.

Figura 32. Conceptos de encendido "flame-jet" y ubicación de la bujía. a) Con cámara de generación de turbulencia; b) Con precámara para carga estratificada y con inyector auxiliar; c) Con precámara para carga estratificada y válvula auxiliar para admisión de mezcla enriquecida.



HEYWOOD, John B., Internal Combustion Engine Fundamentals. McGraw – Hill. Nueva York, 1988. p. 448.

La energía de la fase inductiva constituye de 30 mJ – 60 mJ. Durante el arranque del motor frío la fase inductiva contribuye al calentamiento del volumen inicial de la mezcla inflamable.

La principal característica del sistema de encendido convencional es la dependencia de la tensión  $U_{2m}$ , creada por la bobina de encendido, de la frecuencia de rotación del cigüeñal del motor  $N_m$  (figura 31).

La curva real 2 (figura 31) se sitúa por debajo de la teórica, ya que entre los contactos del interruptor, siendo lenta la interrupción tiene lugar la formación de arcos.

Los sistemas de encendido que se están diseñando se combinan con cámaras especiales y válvulas de turbulencia, con lo que se pretende quemar mezclas cada vez más pobres (LEV y ULEV). Entre estos sistemas se instalan los de alta energía, el encendido "plasma – jet" y el encendido "flame - jet" (figura 32).

## 2.6 OSCILOGRAMAS DEL ENCENDIDO

Los oscilogramas del encendido son una representación gráfica de lo que sucede en el sistema de encendido, se utilizan para determinar si el sistema de encendido está funcionando correctamente o para localizar fallas. La condición del sistema de encendido de un vehículo puede determinarse observando las formas de onda y relacionando las secciones de la forma de onda a las fases de operación del sistema de encendido que representan. Las fallas se identifican por movimientos de forma de ondas que no son característicos al sistema de encendido que se está probando.

Las formas de onda representan los valores de voltaje con relación a los valores de tiempo; a medida que aumenta el voltaje secundario, las cargas en la bujía se refuerzan hasta que la mezcla aire-combustible en la separación cambia de no conductora a conductora. Esto podría consumir de 4 a 18 kV del voltaje disponible.

Al momento de la ionización de la mezcla entre los electrodos de la bujía, el voltaje cae inmediatamente. Esta caída es la parte capacitiva del arco de la chispa. Empieza el proceso de combustión.

Después de la ionización, la mayor parte del voltaje restante de la bobina se disipa mientras la corriente pasa a través de los electrodos. Esta es la parte inductiva del arco de la chispa. Las oscilaciones que ocurren a medida que el flujo de electrones comienza, justo después del voltaje de ruptura, son creadas por la inducción ocurriendo a través de los embobinados y la capacitancia entre las vueltas. El voltaje de ruptura que inicia el arco es muy rápido (cerca de 2 nanosegundos).

La chispa llena el vacío a un valor constante bastante bajo de aproximadamente 1 a 4 kV. A medida que la mezcla aire-combustible empieza a quemarse, se vuelve cada vez más difícil para la energía restante sostener la chispa. Cuando el voltaje restante se reduce (iguala) al nivel del voltaje de línea de la chispa (C-D en la

figura 33), la chispa se extingue. Una resistencia incrementada aparece en la forma de onda como un levantamiento en la línea de chispa hacia D (figura 33).

Las imágenes del sistema de encendido de platinos son similares a las de los sistemas de encendido electrónico. La diferencia principal ocurre en la línea de chispa en las imágenes primarias. El condensador en el sistema de platinos causa oscilaciones; los sistemas electrónicos no tienen condensador. En las secciones de intervalo primaria y secundaria, también se harán evidentes algunas variaciones, cuando se compare un sistema de platinos con sistemas electrónicos que incorporan una función limitadora de la corriente o un control automático de intervalo.

A continuación se hará una diferenciación de los oscilogramas de encendido primario y secundario, y se describirá cada una de sus fases.

#### 2.6.1 Oscilograma primario (figura 33).

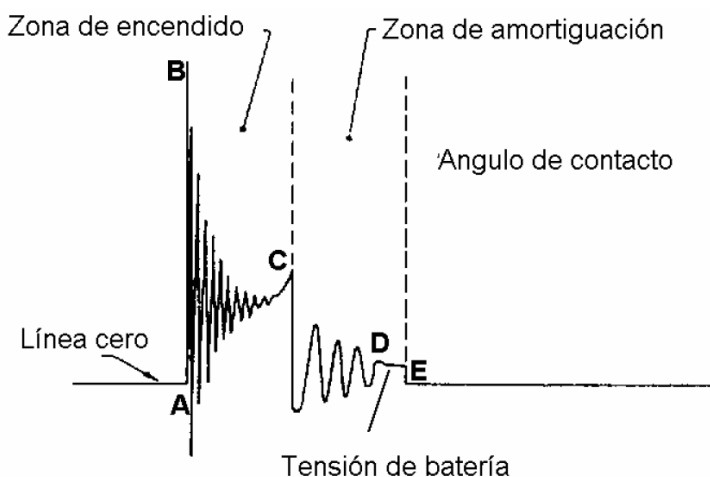
A-B: Carga inicial del condensador debido a la autoinducción en el primario.

B-C: Oscilaciones de carga y descarga del condensador sobre el primario mientras que existe chispa entre los electrodos de la bujía.

C-D: Fase de amortiguación de las oscilaciones y disipación de la energía una vez extinguida la chispa.

D-E: Estabilización de la tensión a la de la batería y cierre de contacto en el punto E, por lo que la tensión es cero.

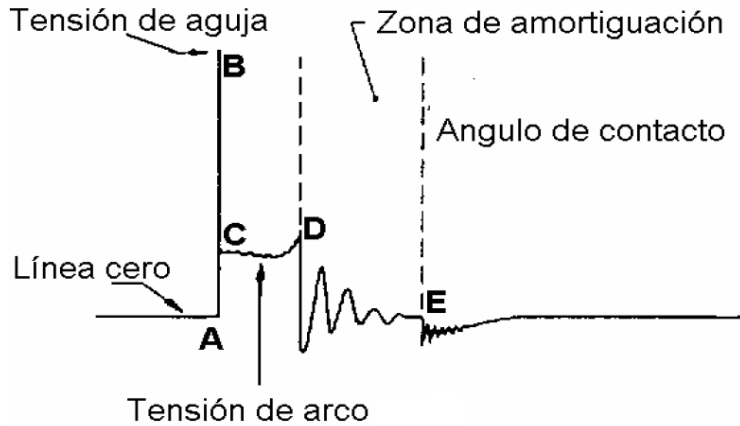
Figura 33. Oscilograma de encendido en el bobinado primario.



Obtenido de internet:

<<http://mgallegosantos.wordpress.com>>

Figura 34. Oscilograma de encendido en el bobinado secundario.



Obtenido de internet:

<<http://mgallegosantos.wordpress.com>>

#### 2.6.2 Oscilograma secundario (figura 34).

A-B: Tensión de encendido o de aguja. Tensión necesaria para iniciar la sucesión de chipas.

B-C: Bajada de tensión, ya que la resistencia al salto de chispa es menor.

C-D: Tensión de arco. Tensión entre los electrodos mientras se mantiene la chispa.

D-E: Zona de amortiguación donde se disipa la energía almacenada.

E-A: Se inicia la zona de cierre de primario. Representa la F.E.M. inducida en el secundario al establecerse la corriente de nuevo.

#### 2.7 IONIZACIÓN DE LA MEZCLA ENTRE LOS ELECTRODOS DE LA BUJÍA

Los electrones se mueven a través del espacio entre los electrodos de la bujía; no obstante, esto es un circuito abierto. Cuando el voltaje está tratando de empujar electrones a través de un circuito abierto, formará primero una corona, también conocido como campo eléctrico de baja energía, entre los electrodos de la bujía.

Una vez que la corona se ha formado, dará comienzo la ionización. Se necesita de un voltaje muy alto para comenzar la ionización. El potencial eléctrico aplicará la fuerza suficiente sobre los átomos entre los electrodos de la bujía para liberar a los

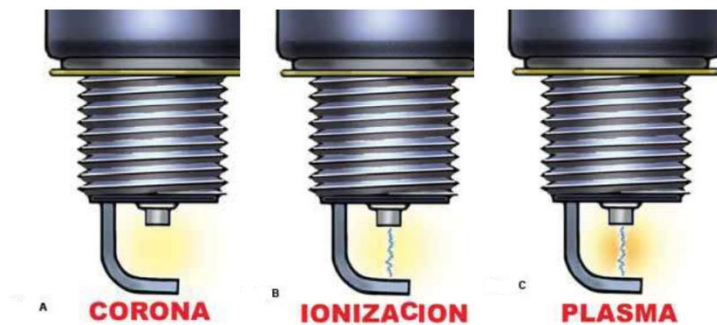
electrones. Los átomos que han liberado electrones se convierten entonces en iones positivos. Este es un voltaje de ruptura, o el voltaje requerido para forzar a los electrones a través de la resistencia.

En este caso, la resistencia es la distancia entre los electrodos de la bujía. Entre mayor sea el espacio de separación de la calibración de la bujía o mayor sea la resistencia entre los electrodos, mayor será el voltaje de ruptura. Este voltaje de ruptura se lee en kV (kilovoltios) y es la cantidad de energía requerida para superar la resistencia total dentro del circuito. Una vez que los electrones han cruzado la calibración, la ionización está completa.

Una vez que la ionización ocurre, los electrones libres y los iones positivos forman un camino a través de los electrodos de la bujía. Esto ocurre en un punto donde el número de electrones fluyendo igualan al número de iones positivos, con lo que se produce el plasma. El plasma es un gas caliente ionizado que envuelve a los electrones que fluyen a través de él, con lo cual disminuye la resistencia entre los electrodos de la bujía. La resistencia del plasma se ve afectada por el gas y la presión. El plasma disminuirá el voltaje requerido para mantener el flujo de electrones en los electrodos.

Si las condiciones cambian, la capacidad de ionización de los átomos también cambiará. La cantidad de compresión modificará la densidad de la mezcla, lo cual tendrá un efecto directo sobre la ionización. La turbulencia dentro del cilindro también modificará las características de la señal de onda de ignición.

Figura 35. Fases de la ionización de la mezcla entre los electrodos de la bujía.



Obtenido de internet:

<<http://encendidoelectronico.com> >

## 2.8 COMPONENTES COMERCIALES DEL SISTEMA DE ENCENDIDO

### BOBINA DE ENCENDIDO

Su función es convertir la corriente pulsante de baja tensión (12 V) en corriente de alta tensión (11kV - 20 kV) para romper la resistencia (huelgo de aire) entre los electrodos de la bujía. Esto se logra con dos embobinados diferentes de alambre de cobre (ya se trate de las tradicionales bobinas cilíndricas, bobinas de encendido con distribuidor o bobinas de encendido sin distribuidor). El primer embobinado se le conoce como el primario y al segundo embobinado como el secundario. El núcleo es laminado para reducir el efecto de las corrientes parásitas, conocidas como corrientes de Eddy, que se dan en el metal del núcleo, significativas a frecuencias del orden de 20 a 500 pulsos por segundo.

El embobinado primario utiliza un diámetro mayor de alambre con menos espiras aproximadamente 350. Esto permite que tenga un valor de resistencia muy bajo de 1  $\Omega$  a 4  $\Omega$ . El secundario usa un alambre de menor diámetro con muchas más espiras aproximadamente 20 000, para producir un valor de resistencia mucho mayor, desde 8 000  $\Omega$  hasta 16 000  $\Omega$ . La bobina de automóvil por lo regular tiene una proporción entre 1:150 y 1:200. En otras palabras, por cada vuelta del embobinado primario, el secundario tiene de 150 a 200 vueltas. Algunas bobinas de encendido requieren una resistencia externa para limitar el flujo de corriente. Además, la magnitud de la tensión de salida depende de los siguientes factores:

- Intensidad de campo magnético
- Velocidad a la que se colapsa el campo magnético
- Tiempo de carga de la bobina

Cuenta con dos conexiones para el primario, una de alimentación positiva desde el contacto de encendido del motor, y una del negativo al dispositivo de interrupción cíclica del primario. La interrupción cíclica del primario está sincronizada con el motor, una vez cada giro del cigüeñal en un motor dos tiempos o una vez cada dos giros en un cuatro tiempos; aunque existen sistemas de 4 tiempos en motores de más de un cilindro, con chispa en cada revolución (sistemas de chispa perdida o DIS). Dicha interrupción era antiguamente mecánica gracias al ruptor o platinos, y hoy día se realiza mediante un circuito electrónico, siendo un transistor de potencia que depende de un controlador asociado al régimen del motor gracias a un sensor de régimen. El bobinado secundario está conectado internamente al bobinado primario y externamente a la salida de alta tensión, hacia la bujía o hacia el distribuidor cuando se tiene.

El principio de funcionamiento de la bobina de encendido se basa en la ley de Faraday, la cual establece que, si el devanado primario recibe una corriente variable en el tiempo se genera un flujo enlazado  $\psi$ , también variable y a su vez, dicho flujo enlazado variable  $\psi$  genera una tensión eléctrica en el secundario o

fuerza electromotriz inducida (F.E.M.), que es directamente proporcional al flujo magnético enlazado, e inversamente proporcional al tiempo de la variación.

$$f.e.m. = \frac{d\psi}{dt}$$

$$\psi = N\phi$$

Dónde:

$f.e.m.$  → Fuerza electromotriz

$d\psi$  → Diferencial de flujo magnético enlazado

$dt$  → Diferencial de tiempo

$\phi$  → Flujo magnético

$N$  → Número de espiras

Los embobinados primario y secundario están aislados uno del otro mediante un aceite dieléctrico o una resina epoxy. El aceite de transformador puede soportar un voltaje de ruptura de hasta 50 kV. El primario y el secundario están acoplados magnéticamente, de modo que todo lo que afecte a un embobinado se reflejara en el otro y viceversa.

En las últimas décadas, la técnica de encendido ha estado en continuo desarrollo y, con ella, la bobina de encendido. Actualmente se utilizan distintas estructuras de bobinas de encendido dependiendo de la antigüedad del vehículo, de la construcción del motor y del sistema de encendido.

**Bobinas de encendido cilíndricas:**

En los vehículos antiguos, encontramos con frecuencia las llamadas bobinas de encendido cilíndricas. Antiguamente, estas se llenaban de aceite y tenían riesgo de fugas.

**Bobinas de encendido de distribuidor:**

En las bobinas de encendido de distribuidor, la alta tensión generada se transmite a la bujía de encendido correspondiente a través del distribuidor de encendido.

**Bloque de bobinas:**

Los bloques de bobinas de encendido contienen varias bobinas de encendido. A través de los cables de encendido, se suministra alta tensión a varias bujías directamente desde la bobina. Este tipo de bobina de encendido está disponible con técnica de chispa simple o de doble chispa. En la técnica de chispa simple,

cada cable de encendido suministra alta tensión a un cilindro. En la técnica de doble chispa, el impulso de alta tensión se conduce siempre hasta dos cilindros al mismo tiempo, uno de los cuales se encuentran en el ciclo de trabajo.

Figura 36. Bobinas de encendido.



Bobina cilíndrica



Bobina de distribuidor



Bloque de bobinas



Bobina tipo lápiz



Sistema de bobinas de encendido

NGK, folleto bobinas de encendido, 2012.

Bobinas de encendido tipo lápiz:

Este tipo de bobinas de encendido se instala directamente en la bujía de encendido. Se este modo, el impulso de alta tensión se genera directamente en la bujía de encendido, con lo que las pérdidas de potencia se reducen al mínimo. Además, se gana espacio, ya que la caja de bujías de encendido existente también se utiliza para la bobina de encendido. Las bobinas de encendido tipo lápiz se utilizan en vehículos con encendido completamente electrónico y están disponibles con sistemas de chispa simple y de doble chispa.



Sistemas de bobinas de encendido:

En este tipo de bobinas de encendido, hay integradas varias bobinas de encendido tipo lápiz en un solo componente conocido como rail y se instalan de forma conjunta en las bujías de encendido.

## BUJÍAS

Su función es producir un arco eléctrico entre sus electrodos para encender la mezcla de aire y combustible. La calidad de este encendido influye en muchos aspectos fundamentales para el funcionamiento del vehículo y para el medio ambiente, como la suavidad de marcha, el rendimiento y las emisiones contaminantes.

Si tenemos en cuenta que una bujía tiene que encender la mezcla entre 500 y 3500 veces por minuto, entenderemos la importancia de contar con una tecnología de encendido moderna para cumplir las normas relativas a los gases contaminantes y reducir el consumo de combustible.

La temperatura de la bujía ha de estar dentro de unos límites comprendidos entre los 600 y 800 °C. Si la temperatura de la bujía está por encima de la temperatura de funcionamiento, da lugar a encendidos por incandescencia (autoencendido); si por el contrario, la temperatura de la bujía es menor de la de funcionamiento, las partículas de aceite y hollín que se depositan sobre el pie del aislador, no desaparecen por ignición, pudiéndose originar derivaciones de corriente.

En consecuencia existe una clasificación de las bujías por su grado térmico, dependiendo de su capacidad de transferencia de calor desde el lugar de encendido, en el pie del aislador, hasta el sistema de refrigeración y al medio ambiente. Las bujías con bajo grado térmico se denominan bujías calientes y las bujías con alto grado térmico se denominan bujías frías.

La estructura de una bujía de encendido está compuesta por:

**Conexión:** El acople es una conexión SAE o rosca de 4 mm. En ella se conecta el cable de encendido o una bobina de varilla, desde donde (en ambos casos) deberá transportarse una tensión alta al otro extremo de la bujía.

**Aislador:** El aislador cerámico tiene dos funciones. Sirve básicamente para aislar, evitando que se produzca un salto de la alta tensión a la masa del vehículo y conducir el calor liberado en la combustión a la culata.

**Barreras de la corriente de escape:** En la parte externa del aislador, las barreras de la corriente de escape con forma ondulada evitan la salida de la tensión a la masa del vehículo. Alargan el trayecto que hay que recorrer y aumentan la

resistencia eléctrica. De esta forma garantizan que la energía recorra el trayecto de menor resistencia, a través del electrodo central.

Resistencia antiparasitaria: Para garantizar la compatibilidad electromagnética (CEM) y el funcionamiento correcto del sistema electrónico de a bordo, en el interior de la bujía hay un vidrio fundido que funciona como resistencia a las interferencias.

Electrodo central con núcleo de cobre: El electrodo central de una bujía de encendido estándar consta normalmente de una aleación de níquel. Desde el extremo de este electrodo, la chispa tiene que saltar al electrodo de masa.

Anillo obturador: El anillo obturador evita que salga gas de combustión por la bujía, incluso cuando la presión de la combustión sea muy alta. De esta forma se evitan pérdidas de presión. Por otra parte, conduce el calor a la culata y equilibra los diferentes comportamientos de expansión de la culata y la caja de la bujía.

Juntas interiores: Las juntas interiores forman una unión resistente a los gases entre el aislador y la caja metálica.

Electrodo de masa: El electrodo de masa de una bujía de encendido estándar está fabricado con una aleación de níquel. En el funcionamiento normal, representa el polo opuesto al electrodo central.

Figura 37. Bujía.

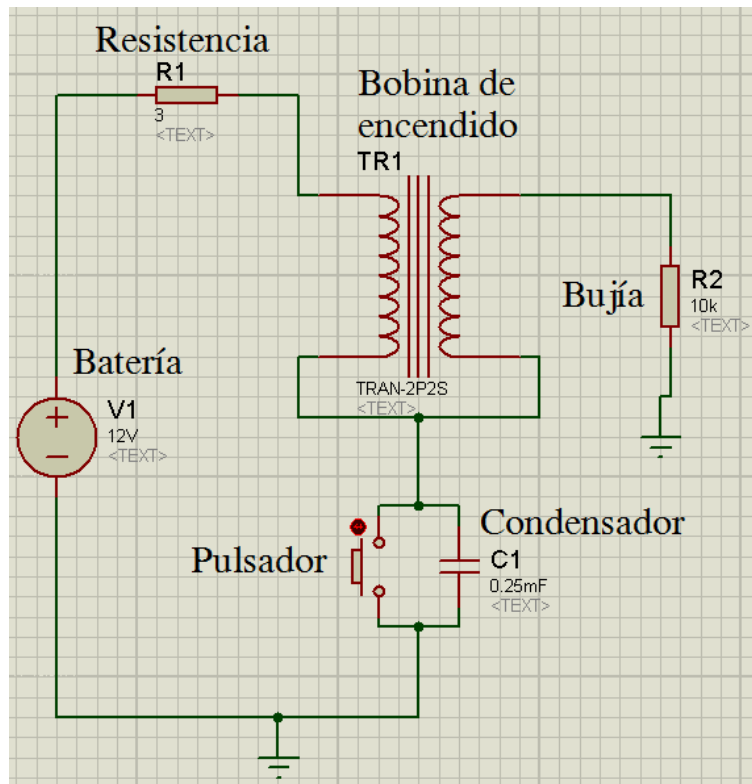


NGK, catalogo bujías de encendido, 2013.

### 3. MODELADO, SIMULACIÓN DEL SISTEMA DE ENCENDIDO COMO CIRCUITO ELÉCTRICO Y ADAPTACIÓN DE UN SISTEMA DE ENCENDIDO MULTICHISPA

Para la simulación del sistema de encendido se utiliza un software de simulación de circuitos eléctricos llamado PROTEUS 7.7. Se hicieron algunas simplificaciones del sistema como fue eliminar el distribuidor y trabajar con una sola bujía. Primero se utilizó como base el circuito de la figura 38, consta de la batería de 12 V, una resistencia en serie con la bobina de encendido, un condensador conectado en paralelo con un pulsador que realizan la función de los platinos la cual es abrir y cerrar el circuito primario, adicionalmente se utilizó una resistencia para simular la bujía.

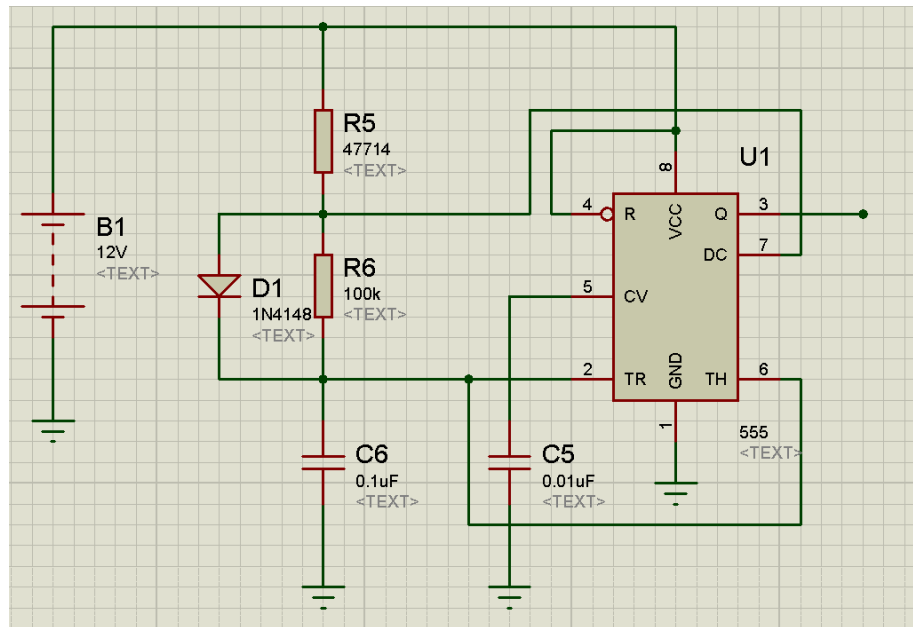
Figura 38. Circuito eléctrico básico del sistema de encendido.



Sin embargo con este pulsador no se puede obtener la respuesta en tiempo real de la señal, por lo tanto se procedió a diseñar una oscilador biestable que utilizando un relé abre y cierra el circuito para visualizar la respuesta de la señal en tiempo real en el osciloscopio del software.

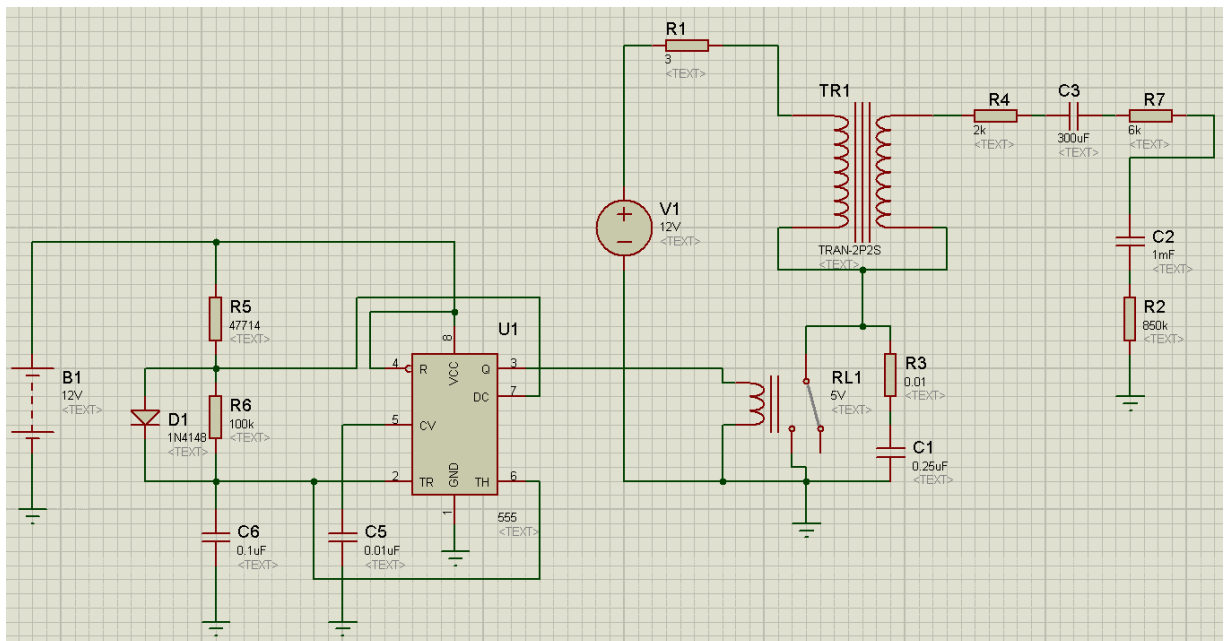
En la figura 39 se muestra un oscilador biestable cuyo componente principal es un circuito integrado 555, este oscilador fue diseñado para simular los tiempos de conexión y desconexión observados en el banco de pruebas construido previamente.

Figura 39. Oscilador biestable.



Finalmente se obtuvo el circuito de la figura 40 integrando el oscilador biestable y el circuito del sistema de encendido teniendo en cuenta la resistencia de los cables de alto voltaje y el efecto capacitivo del salto de la chispa en el distribuidor y en la bujía.

Figura 40. Circuito final de la simulación.



En resumen se obtuvo unos oscilogramas similares a los esperados pero no se obtuvo exactamente las mismas gráficas debido a que en la simulación no se tenían modelos exactos para la bobina de encendido ni para la bujía.

Por una parte la bobina de encendido no es un transformador ideal ya que consta de dos bobinas acopladas con núcleo ferromagnético que a diferencia de los transformadores comunes posee un circuito magnético abierto, es decir el núcleo ferromagnético no forma un bucle cerrado alrededor del embobinado. El calibre de los cables es diferente en ambos devanados, el devanado primario es de pocas espiras y de un calibre grueso a diferencia del devanado secundario que tiene muchas espiras y un calibre más delgado. En el anexo A se hace referencia a algunos valores utilizados para las resistencias, inductancias y capacitancias del circuito en la simulación.

Por la otra parte en la bujía se presenta un fenómeno complejo de ionización de la mezcla entre los electrodos que interviene directamente en desarrollo de la fase capacitiva e inductiva de la descarga.

Figura 41.Oscilograma primario obtenido de la simulación.

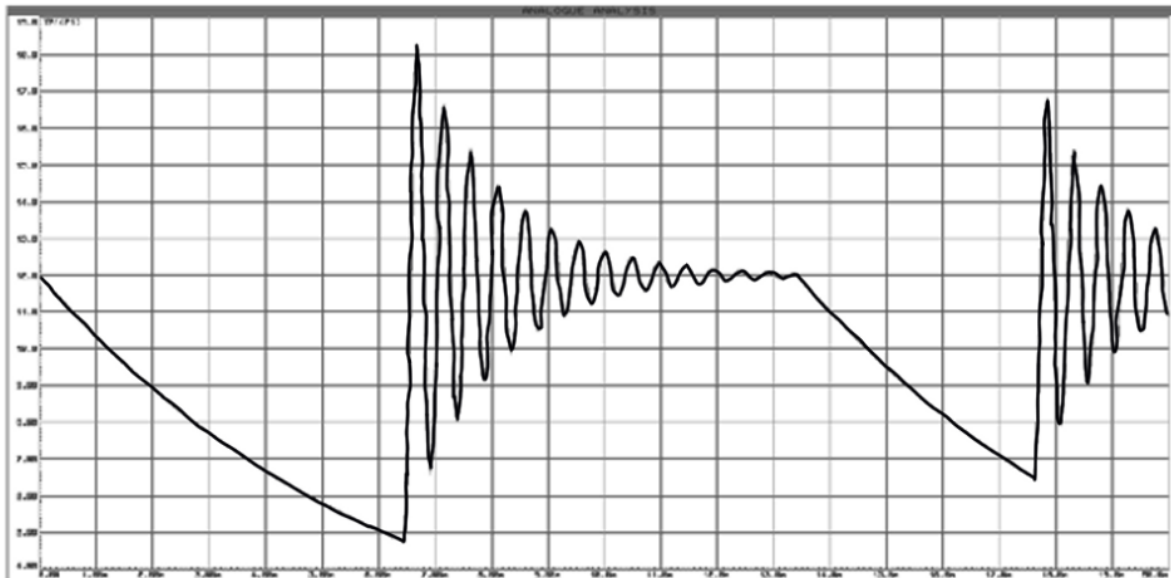
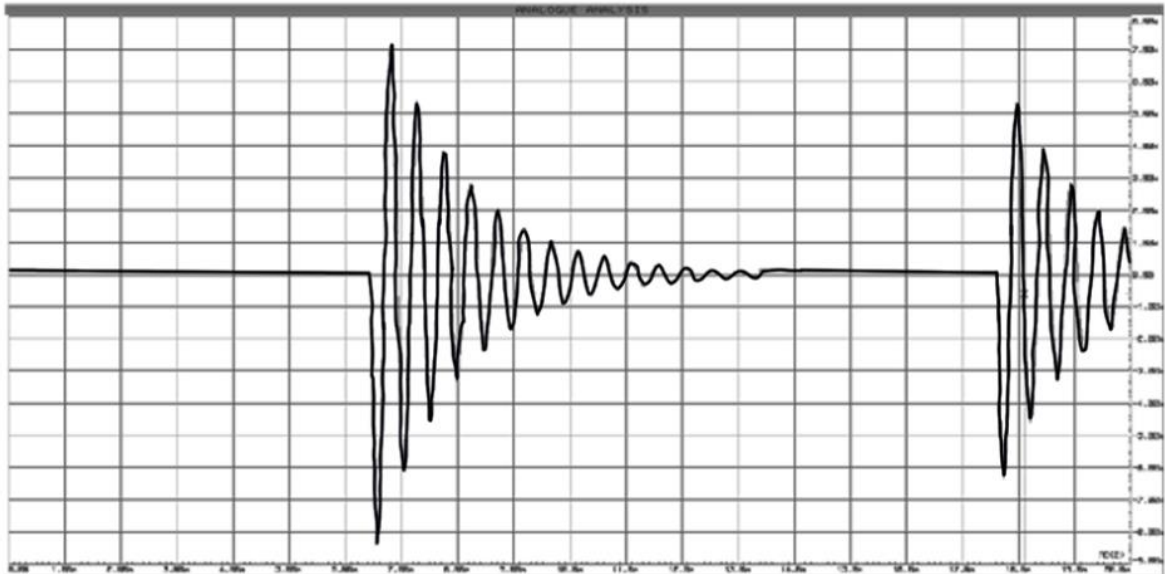


Figura 42. Oscilograma secundario obtenido de la simulación.



### ADAPTACIÓN DE UN SISTEMA DE ENCENDIDO MULTICHISPA

Un sistema de encendido multichispa a diferencia de un sistema de encendido convencional puede producir múltiples descargas de alto voltaje a través del entrehierro de las bujías del motor en un solo ciclo de trabajo. Idealmente se toma una señal de temporización asociada con el motor y se utiliza para accionar un circuito de control de duración el cual a su vez acciona un circuito de control de tasa de repetición y así controla la duración y frecuencia de las descargas a través del entrehierro. A bajas revoluciones el control de tasa de repetición proporciona múltiples descargas las cuales intensifican el proceso de combustión.

Inicialmente se pensaba construir este sistema de encendido pero requería un estudio avanzado de electrónica de potencia y se decidió dejar esta construcción para otro proyecto más enfocado al área de la electrónica. En el anexo H se propone un circuito eléctrico de un sistema de encendido multichispa que si esta sincronizado con el giro del cigüeñal.

Se optó por comprar el módulo mostrado en la figura 43, está compuesto por un oscilador biestable y una bobina de encendido la cual hace la transformación del voltaje de alimentación de 12 V a un alto voltaje del orden de miles de voltios que entrega directamente al distribuidor y así a cada una de las bujías en cada cámara de combustión, este módulo no cuenta con ningún sistema de sincronización con el ángulo de giro del cigüeñal. En la figura 44 se muestra el diagrama de conexión del equipo al motor.

Figura 43. Sistema de encendido multichispa.



Los sistemas de encendido como el MSD 6A y sus equivalentes de otros fabricantes producen una serie de múltiples chispas durante la rotación del cigüeñal, asegurándose que se queme totalmente la mezcla. A altas revoluciones no hay tiempo suficiente para apagar y encender la chispa y la bobina no se puede recuperar muy rápido, así que se opta por una chispa de larga duración, 20 grados de rotación del cigüeñal. Esta tiene múltiples beneficios. También se pueden comprar módulos limitadores de revoluciones, retardadores de encendido para cuando se activa el óxido nitroso, retardadores de encendido que facilitan el encendido en frío y avance controlado desde la cabina.

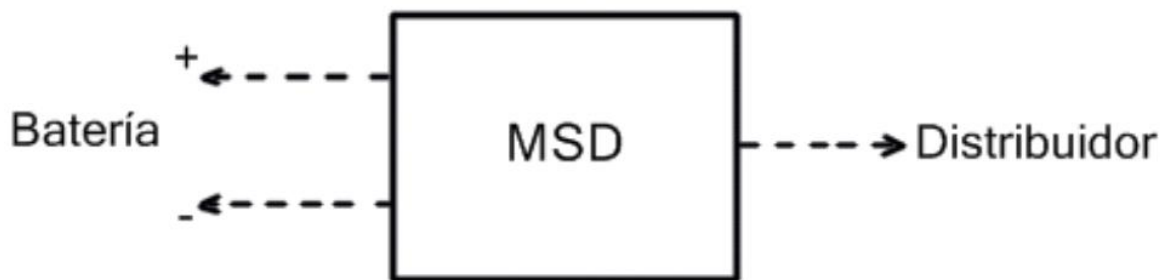
Un incremento de energía del sistema de encendido prolongando la descarga consiste en dos fuentes de energía, la fuente principal, un sistema convencional con bobina de encendido y sistema de disparo; una fuente secundaria, ofreciendo la energía adicional. La fuente secundaria usa un convertidor de voltaje CC-CC para cargar un condensador al nivel de 1 kV. La energía almacenada es transferida a la parte secundaria de la bobina de encendido durante la descarga eléctrica en la bujía. La energía de la chispa es liberada principalmente en forma de resplandor.

Se ha obtenido un encendido mejorado por una energía más alta de la descarga eléctrica, a través de una chispa de mayor duración o bobinas de encendido con parámetros especiales, y una mayor potencia de ruptura de descarga. Sistemas de encendido experimentales de larga duración entregan más de 80 mJ de energía a la bujía, alcanzando una potencia de chispa de 12 W. Investigadores de motores han encontrado que motores operando con estas mejoras del sistema de encendido tienen significativamente mejores límites de rendimiento con mezclas pobres, con mejor variabilidad, eficiencia y menos emisiones.

Las influencias ejercidas en el proceso de combustión por la modificación de los parámetros de la descarga siguen siendo hoy en día controversiales, siendo el encendido un proceso complejo, con muchas interacciones en la combustión.

La mayoría de los estudios basados en la visualización de la llama y el análisis del calor liberado ha mostrado que los principales efectos fueron relacionados a la iniciación de la llama y al desarrollo del núcleo de la llama, correspondiendo a una liberación de energía de 1% - 5%.

Figura 44. Diagrama de conexión del equipo al motor.



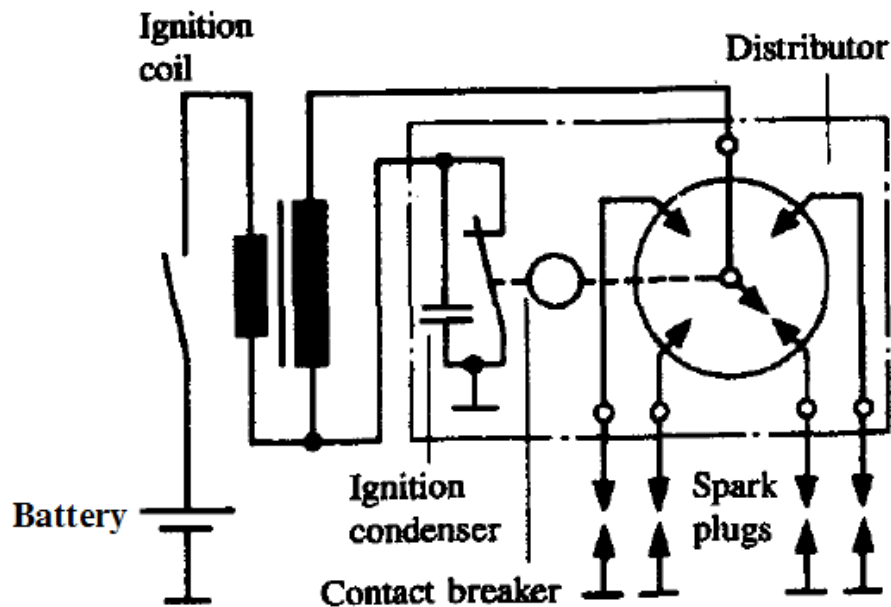


## 4. DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN BANCO PARA PRUEBAS DEL SISTEMA DE ENCENDIDO

### 4.1 DESCRIPCIÓN DEL BANCO

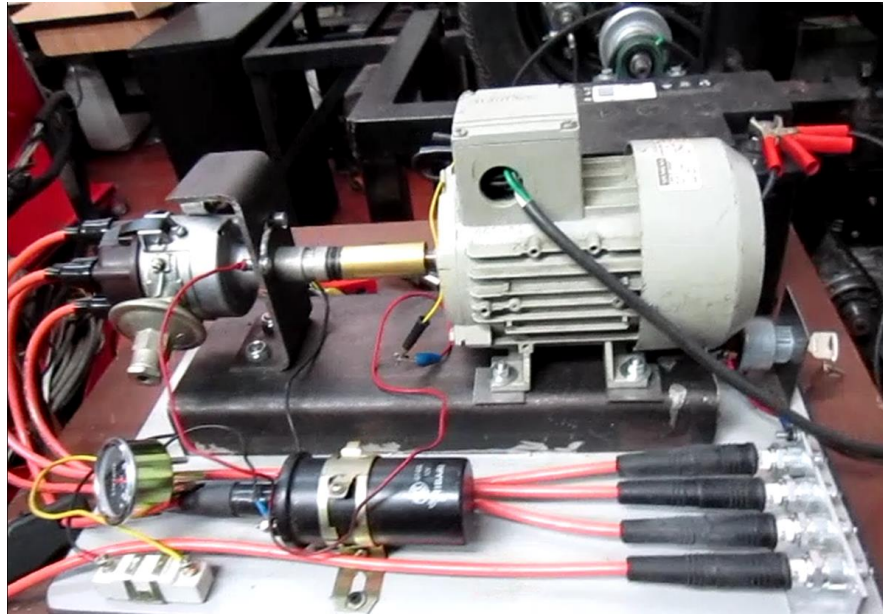
Se diseñó y construyó un módulo para realizar pruebas y analizar señales del sistema de encendido el cual se muestra en la figura 46. Está basado en el diagrama esquemático de la figura 45, compuesto por una batería, un distribuidor el cual es accionado por un motor trifásico (se utilizó un variador de velocidad para simular las revoluciones del motor), una bobina de encendido, una resistencia, cables de alto voltaje y 4 bujías.

Figura 45. Diagrama esquemático del sistema de encendido convencional.



HEYWOOD, John B., Internal Combustion Engine Fundamentals. McGraw – Hill. Nueva York, 1988. p. 438.

Figura 46. Banco de pruebas del sistema de encendido.



#### 4.2 PRUEBAS DEL SISTEMA DE ENCENDIDO CONVENCIONAL

Utilizando el analizador de señales del laboratorio de máquinas de combustión interna se visualizaron los oscilogramas de encendido en el devanado primario y secundario de la bobina de encendido los cuales son de gran utilidad para entender el funcionamiento del sistema de encendido de los motores de encendido provocado.

Se simula una velocidad de 2500 RPM y se obtienen las siguientes gráficas en el devanado primario y secundario (figuras 47 y 48).

Figura 47. Oscilograma de encendido primario.

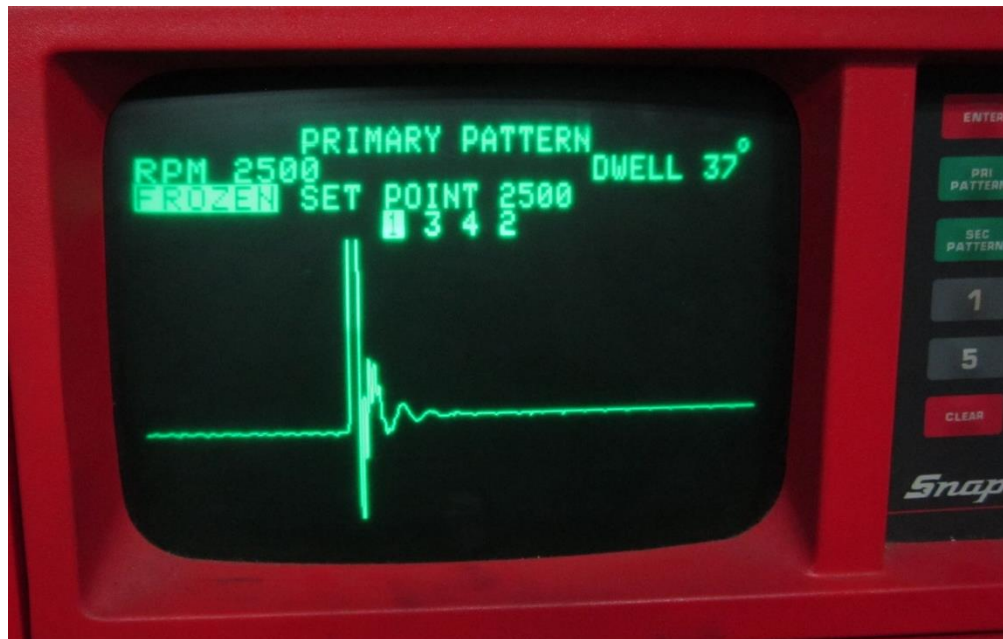
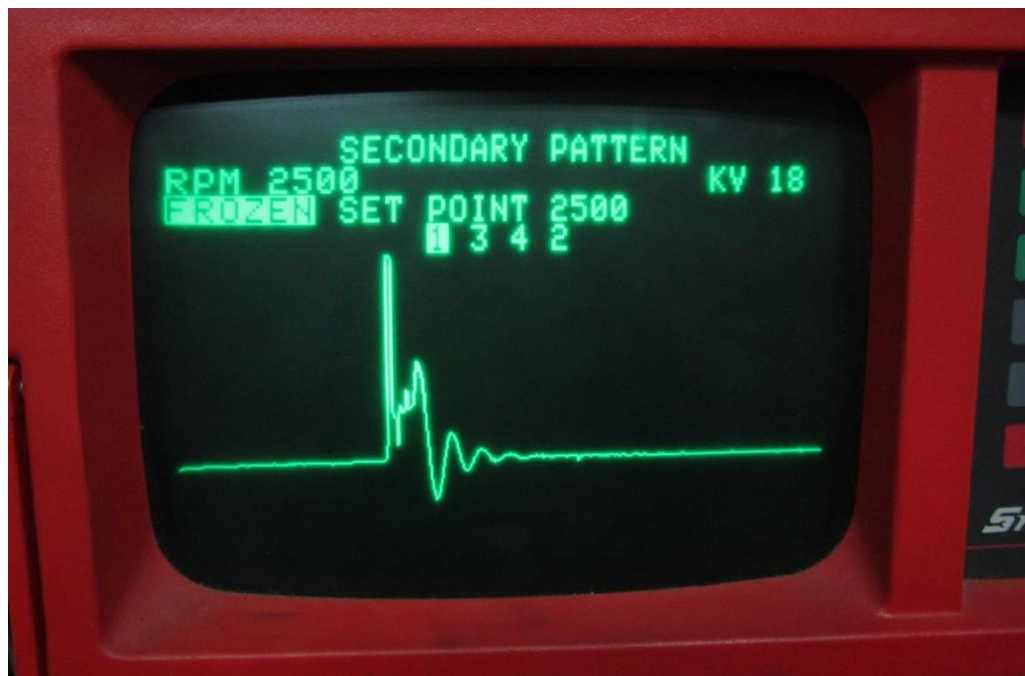


Figura 48. Oscilograma de encendido secundario.



## 5. RESULTADOS COMPARATIVOS DE LAS PRUEBAS DE DESEMPEÑO DEL MOTOR, OPERANDO CON EL SISTEMA DE ENCENDIDO ORIGINAL Y EL SISTEMA DE ENCENDIDO MULTICHISPA

### 5.1 CARACTERIZACIÓN DEL SISTEMA DE ENCENDIDO ORIGINAL DEL MOTOR

El motor a estudiar es un HERCULES G1600, en la tabla 2 se muestran las especificaciones. Cuenta con un sistema de encendido electrónico convencional con un módulo de encendido de Fiat Regatta - Chevrolet Silverado - Peugeot 504 y otros. Este es un componente electrónico de estado sólido y sirve para interrumpir el circuito primario de alimentación de corriente eléctrica a la bobina, realizando la misma función que los platinos que se utilizan hace tiempo. Según el diseño de cada fabricante, los módulos de encendido pueden ser externos o integrados, es decir, están montados en alguna parte del compartimento del motor o dentro de la PCM (computadora de control electrónico del motor) o también, en los modelos más recientes de casi todas las marcas, forma parte de cada bobina de encendido. En el caso de este proyecto se tiene un módulo de encendido externo como el de la figura 49; en la figura 50 se muestra un esquema de este circuito de encendido sin contactos o transistorizado.

El módulo de encendido tiene 4 terminales los cuales están conectados así:

B y C: Conectados a los terminales positivo y negativo de la bobina de encendido.

G y W: Conectados a los terminales del sensor inductivo del distribuidor.

El voltaje de salida del sensor inductivo lo produce una bobina interna. Esta bobina induce un voltaje de salida que sigue, prácticamente, una onda sinusoidal cuando el motor se encuentra en funcionamiento.

La bobina de encendido es del tipo cilíndrica, está conectada al módulo de encendido y al interruptor que da paso a la corriente de la batería.

Figura 49. Módulo de encendido del motor o centralita.



Figura 50. Esquema del circuito de encendido sin contactos (BOSCH).

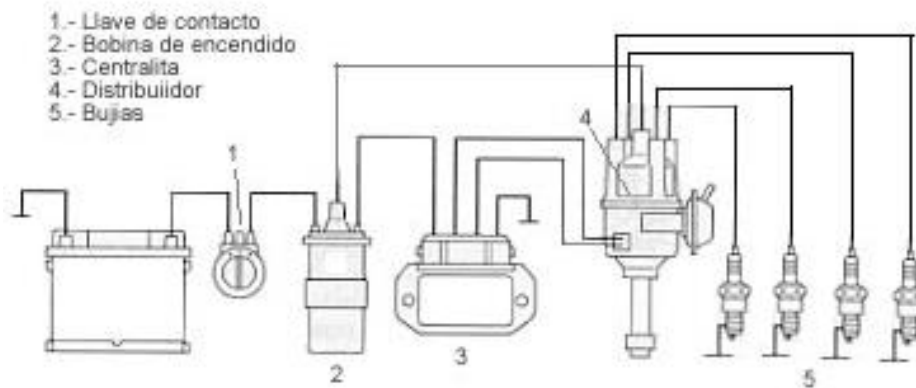


Tabla 2. Especificaciones del motor.

Cilindrada	163 in <sup>3</sup>
Diámetro y carrera	4 in x 3-1/4 in
Número de cilindros	4
Orden de encendido	1-3-4-2
Relación de compresión	7.5:1
Longitud	29.84 in
Altura	23.94 in
Ancho	20.94 in
Peso	420 lb

Obtenido de la ficha técnica del motor.

## 5.2 ADECUACIÓN DEL MOTOR

Para el cálculo de la potencia del motor se utilizó un freno de disco solidario al cigüeñal (figura 51) el cual estaba instalado previamente, sin embargo hubo que diseñar y construir un mecanismo (figura 52) para accionarlo de una manera controlada, simular una posición fija de la palanca del freno y esperar a que la velocidad del motor se regulara para tomar medidas confiables. También se instaló la bomba y la tubería para el líquido de frenos.



Figura 51. Freno de disco solidario al cigüeñal.

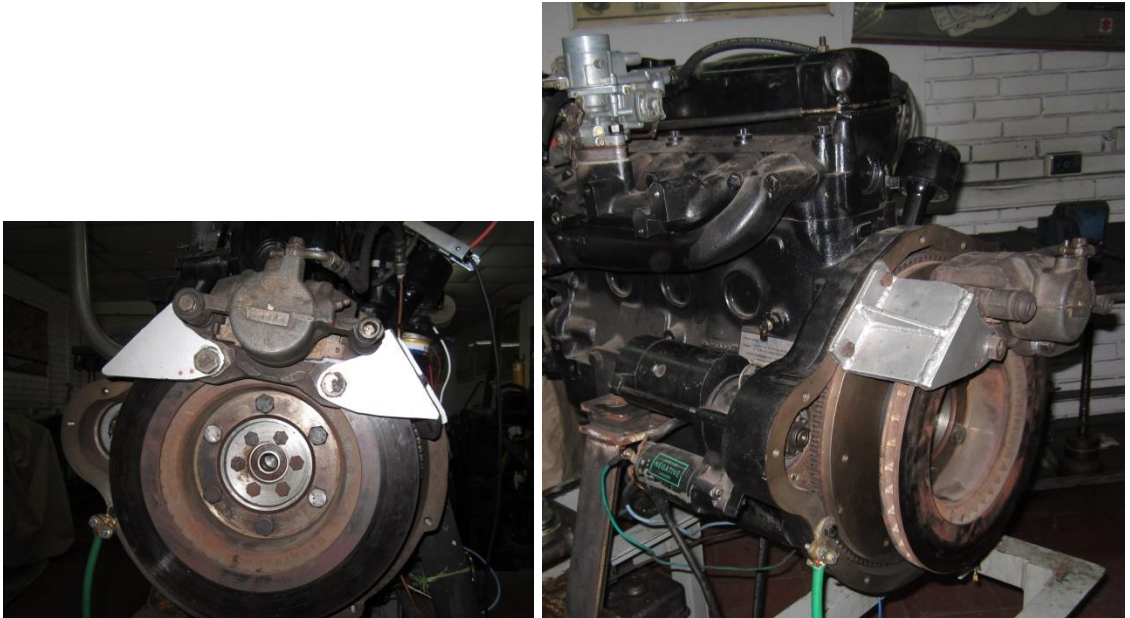


Figura 52. Mecanismo para el accionamiento del freno.

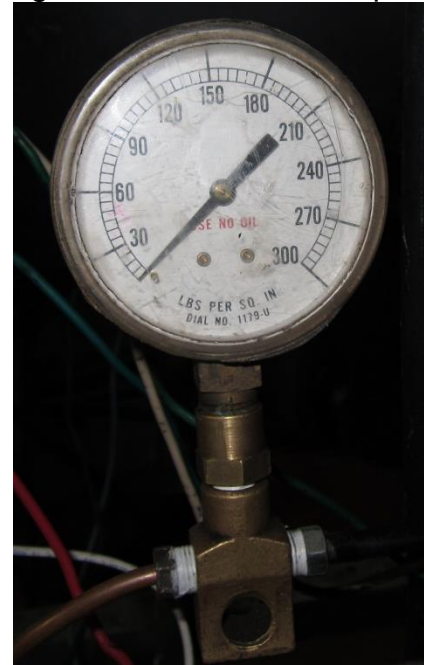


Se instaló un sensor de carga (figura 53) en el mecanismo que acciona la bomba de freno y un manómetro de presión (figura 54) para determinar el par restrictivo que ejerce el freno con una determinada carga.

Figura 53. Sensor de carga.



Figura 54. Manómetro de presión.



Debido a que el carburador que tenía instalado el motor presentaba fugas y consumía mucha gasolina se reemplazó por uno en buen estado.

Figura 55. Carburador nuevo.



Se adecuó una tubería de escape (figura 56) para los gases de combustión de tal manera que no se acumularan dentro del laboratorio.

Figura 56. Tubería de escape.



Se instalaron mangueras nuevas (figura 57) para la circulación del agua de enfriamiento entre el radiador y el motor; adicionalmente se puso un tarro auxiliar para el agua de reserva.

Figura 57. Mangueras para la circulación del agua de enfriamiento.



Se instaló un tanque para el combustible (figura 58).



Figura 58. Tanque de combustible.



### 5.3 ACCESORIOS DEL MOTOR

La potencia neta del motor se obtiene utilizando un freno de disco como dinamómetro en el extremo del eje del cigüeñal en un banco de pruebas, a la correspondiente velocidad del motor, con el equipo y accesorios que se enumeran en la tabla 3.

Tabla 3. Accesorios del motor.

No.	Accesorios
1	Sistema de admisión Colector de admisión
2	Sistema de escape Colector de escape Tubo de escape
3	Alimentación de combustible Tanque de combustible Bomba de alimentación de combustible
4	Carburador
5	Equipo de refrigeración por líquido Radiador Ventilador Bomba de agua Termostato
6	Equipo de ignición electrónico Batería Alternador Distribuidor Módulo de encendido electrónico Bobina de encendido Bujías

## 5.4 ESPECIFICACIONES DEL EQUIPO E INSTRUMENTOS DE MEDICIÓN

5.4.1 Manómetro. Utilizado para medir la presión del líquido de frenos, tiene una resolución de 5 psi

5.4.2 Sensor de carga. Utilizado para medir la fuerza con que se acciona la bomba de freno, tiene una resolución de 0.01 kg

5.4.3 Medidor de frecuencia de giro. Equipo utilizado para calibrar el avance de la chispa y medir las revoluciones del motor en función del número de descargas en la bujía, con una resolución de  $1 \text{ min}^{-1}$

## 5.5 CONDICIONES DEL ENSAYO

- El ensayo de potencia neta consiste en efectuar una corrida con la válvula reguladora completamente abierta para los motores de ignición, y con la carga total fijada para la bomba de inyección de combustible.
- Los datos de funcionamiento se deben obtener bajo condiciones de operación estables, con un suministro de aire fresco para el motor.
- El motor debe haber funcionado, arrancado y calentado de acuerdo con las recomendaciones del fabricante. Las cámaras de combustible pueden contener depósitos, pero en cantidad limitada.
- No se deben tomar datos hasta que el par y la velocidad se mantengan constantes.
- Los datos sobre la carga aplicada al freno, la presión del líquido de freno y las revoluciones del motor, se deben tomar en forma virtualmente simultánea.

## 5.6 PROCEDIMIENTO DEL ENSAYO

1. Se fija una posición de la válvula mariposa del carburador.
2. Se espera hasta que se estabilicen las revoluciones del motor y se toman los datos de carga aplicada al freno, presión del líquido de freno y revoluciones del motor.
3. Luego utilizando el mecanismo construido para accionar la bomba de freno se aumenta la carga en 10 kg y se toman datos nuevamente.
4. Se aumenta la carga 10 kg cada vez hasta llegar a 40 kg como factor de seguridad ya que la celda de carga soporta hasta 50 kg.

## 5.7 DATOS A REGISTRAR

Tabla para la toma de datos. Para la toma de datos se utilizó la tabla 4.

Tabla 4. Tabla utilizada para la toma de datos.

Apertura de la válvula mariposa:		
$\text{min}^{-1}$	Carga (kg)	Presión (psi)

## 5.8 RESULTADOS

Los datos de operación del motor para diferentes aperturas de la válvula mariposa del carburador se encuentran en los anexos E y F al final del documento, las pruebas se realizaron primero utilizando un sistema de encendido electrónico convencional y luego un sistema de encendido multichispa. Los cálculos correspondientes para determinar la potencia del motor de combustión interna con la válvula reguladora completamente abierta con el sistema de encendido electrónico convencional y con el sistema de encendido multichispa, se encuentran resumidos en las tablas 5 y 6.

Tabla 5. Cálculo de la potencia del motor con el sistema de encendido original.

$\text{min}^{-1}$	Presión (psi)	Fuerza (N)	Fr (N)	Par (N.m)	Potencia (kW)
3140	10	238	76	22	7,2
2805	30	715	229	65	19,2
2215	40	953	305	87	20,2
1835	60	1430	458	131	25,1

Tabla 6. Cálculo de la potencia del motor con el sistema de encendido multichispa.

$\text{min}^{-1}$	Presión (psi)	Fuerza (N)	Fr (N)	Par (N.m)	Potencia (kW)
3100	10	238	76	22	7,1
2868	30	715	229	65	19,6
2432	40	953	305	87	22,2
1975	60	1430	458	131	27,1

En las figuras 59 y 60 muestran las curvas de operación del motor con cada uno de los sistemas de encendido.

Figura 59. Curvas de operación del motor operando con el sistema de encendido electrónico convencional.

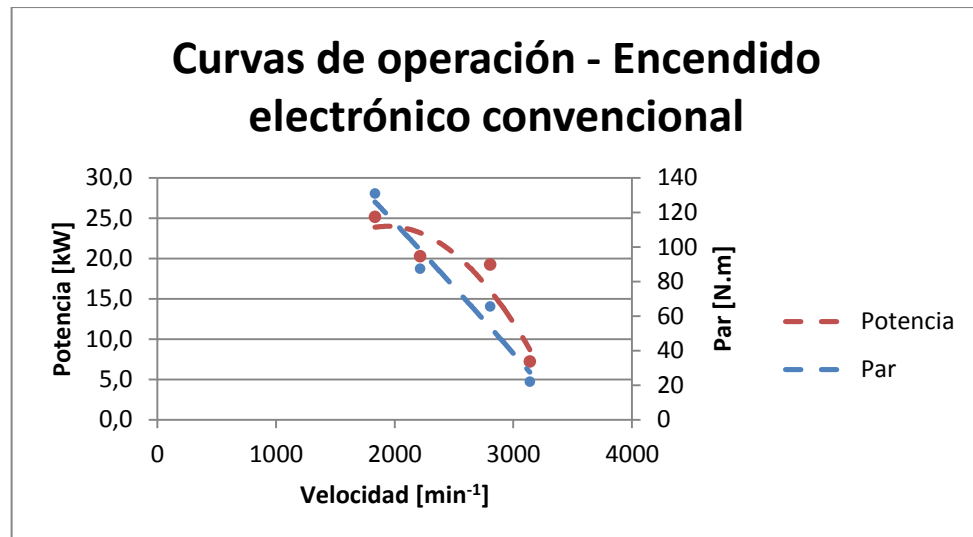
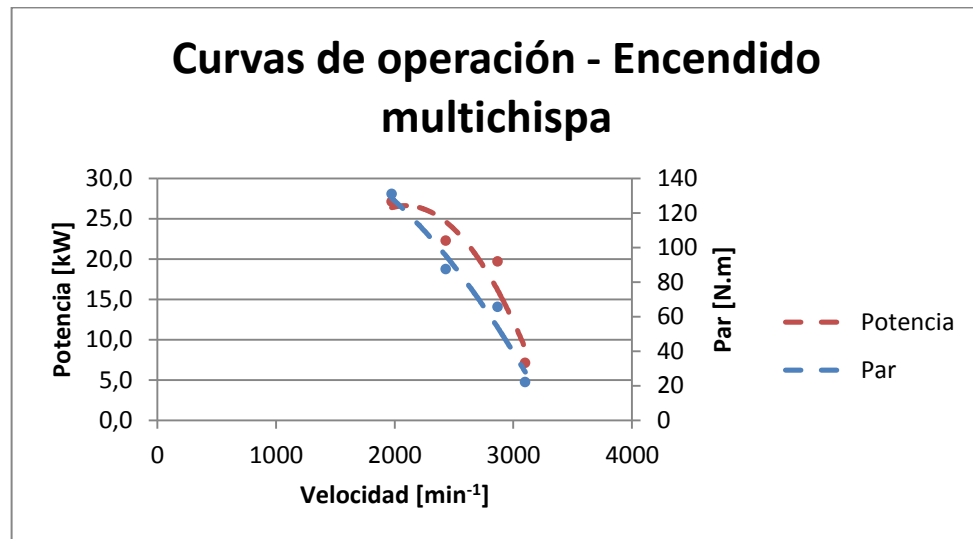


Figura 60. Curvas de operación del motor operando con el sistema de encendido multichispa.



## CONCLUSIONES

Haciendo un análisis de los resultados obtenidos de las pruebas en el banco, las pruebas de operación y sus respectivas curvas del motor operando con el sistema de encendido original (encendido electrónico convencional) y con el sistema de encendido multichispa se logró:

- Profundizar en el conocimiento constructivo y de operación de los sistemas de encendido, así como su influencia en el desarrollo del proceso de combustión.
- Adaptar y experimentar sobre un banco de pruebas de encendido, desarrollado dentro del mismo proyecto, las características de voltaje del sistema multichispa seleccionado y en comparación con el sistema de encendido convencional.
- Probar el desempeño del sistema de encendido multichispa instalado en un motor comercial.
- La simulación de fenómenos complejos como la descarga eléctrica en una bujía o la fuerza electromotriz producida en la bobina de encendido requiere de modelos matemáticos exactos para obtener resultados confiables.
- Dificultades relacionadas con el ruido electromagnético imposibilitaron la visualización de los oscilogramas del sistema de encendido multichispa en el banco de pruebas.
- El sistema de encendido multichispa probado no cuenta con ninguna sincronización con el ángulo de giro del cigüeñal, por lo tanto en ocasiones puede presentarse encendido prematuro de la mezcla de aire y combustible.
- En general el sistema de encendido multichispa permitió el trabajo del motor, pero con características de irregularidad de revoluciones y a veces detonación.
- Se obtuvo mayor potencia del motor con el sistema de encendido multichispa que con el sistema de encendido electrónico convencional, posiblemente con este sistema se mejora la combustión aunque esto no compensa los posibles daños en el motor debido a un funcionamiento tan irregular y las sobrepresiones que se alcanzan cuando hay encendido prematuro.
- Para realizar pruebas de operación de un motor de combustión interna y obtener una mayor exactitud de las curvas de potencia y par es necesario contar con un dinamómetro hidráulico o magnético que permita variar la carga en un amplio margen de valores y sostenerla hasta que el motor se estabilice.

- Se optó por comprar el sistema de encendido multichispa a un proveedor de la región debido a los problemas ocurridos con la simulación y la falta de conceptos de electrónica de potencia que imposibilitaron la construcción de un sistema de encendido multichispa que pudiera sincronizar el avance del encendido, la duración y cantidad de descargas dependiendo del régimen de operación del motor.
- Puede recomendarse el sistema de encendido adaptado para ocasiones de emergencia. Como alternativa a una falla del sistema de encendido propio de un motor de encendido provocado, acotando que no cuenta con variador de avance de encendido.
- El proceso de combustión en los motores de encendido provocado es un fenómeno complejo en el que intervienen muchas variables y a medida que se pueda controlar una mayor cantidad de dichas variables, se llegará a una mejor eficiencia del proceso y así reducir la huella de carbono y la contaminación al medio ambiente.

## RECOMENDACIONES

- Se debe tener un motor de combustión interna anclado en una cabina con el montaje necesario para medir el torque en línea de una manera segura y con la instrumentación necesaria para controlar el régimen de operación desde fuera y llevar a cabo otras pruebas relacionadas al sistema de encendido.
- Analizar desde el punto de vista electrónico el sistema de encendido multichispa y visualizar los oscilogramas.
- Estudiar otros sistemas de encendido como los DIS ya que son los más utilizados en los automóviles modernos.

## BIBLIOGRAFÍA

- ROMERO, Carlos Alberto. Motores de combustión interna fundamentos de construcción y cálculo.: Universidad Tecnológica de Pereira, 2009. 434 p.
- ROMERO, Carlos Alberto. Termodinámica de los M.C.I. Pereira.: Universidad Tecnológica de Pereira, 1990.
- HEYWOOD, John B. Internal combustion engine fundamentals. Estados Unidos: Mcgraw-Hill Companies, Inc., 1988. 930 p.
- RIBBENS, William B. Understanding automotive electronics. Estados Unidos: Elsevier Science, 2003. 470 p.
- CHIRIAC, Radu; et al. A study of ignition discharge parameters effects on homogeneous mixtures combustion in engine. Rumania, 2001.
- NORMA TECNICA COLOMBIANA, NTC 1930.



## ANEXOS

### A. VALORES UTILIZADOS PARA LAS RESISTENCIAS, INDUCTANCIAS, Y CAPACITANCIAS DEL CIRCUITO EN LA SIMULACIÓN

Resistencia en el devanado primario	100 mΩ
Resistencia en el devanado secundario	10 mΩ
Resistencia en el cable de la bobina al distribuidor	2 kΩ
Resistencia del cable del distribuidor a la bujía	6 kΩ
Resistencia en la bujía	850 kΩ
Inductancia en el devanado primario	20 mH
Inductancia en el devanado secundario	4 H
Capacitancia del condensador en el distribuidor	0,25 μF
Capacitancia debido al salto de la chispa en el rotor del distribuidor	300 μF
Capacitancia debido al salto de la chispa en la bujía	1 mF

### B. CÁLCULO DE LA POTENCIA DEL MOTOR

Para el cálculo de la potencia del motor se usará la fórmula:

$$P = T \cdot \omega$$

Dónde:

$P$ : Potencia [W]

$T$ : Par [N.m]

$\omega$ : Velocidad angular [ $\text{min}^{-1}$ ]

### C. CÁLCULO DEL PAR

En las figuras A y B se plantea la configuración de las fuerzas aplicadas en el sistema de freno utilizado, donde F1 es la fuerza ejercida por la bomba de freno en el sistema hidráulico sobre la pastilla. Para calcular el par producido por el freno de disco se plantea la siguiente ecuación.

$$T = F_r \cdot d \cdot 2$$

Dónde

T: Par restrictivo ejercido por las pastillas de freno [ $N \cdot m$ ]

Fr: Fuerza de fricción ejercida por las pastillas del freno

d: Distancia desde el centro del eje del cigüeñal al centroide de la pastilla del freno [ $m$ ]

2: Se multiplica por dos debido a que la fuerza de fricción se ejerce en las dos pastillas del freno (ver figura B).

Fuerza de fricción **Fr**. Se toma la normal **N** igual a la fuerza **F1** ejercida por la bomba de freno en el sistema hidráulico sobre la pastilla.

$$Fr = N \cdot \mu$$

Donde:

N: Fuerza normal en la pastilla en el momento de frenado [ $N$ ]

$\mu$ : Coeficiente de fricción

Figura A. Diagrama de cuerpo libre de la pastilla del freno.

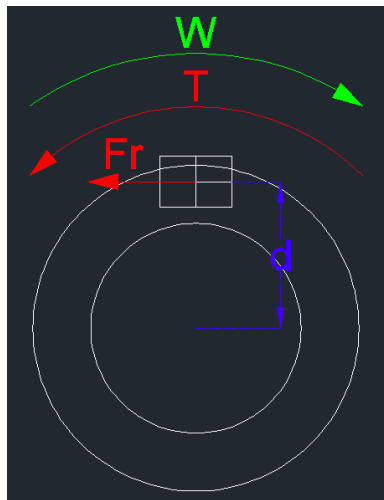
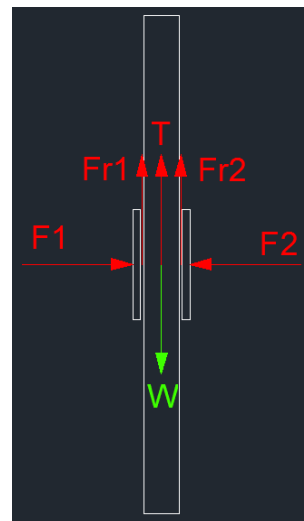


Figura B. Diagrama de cuerpo libre del disco.



Fuerza ejercida sobre la pastilla **F1**.

$$F1 = P \cdot A$$

Dónde:

$F1$ : Fuerza ejercida por la bomba de freno

$P$ : Presión en el líquido de freno

$A$ : Área del pistón del freno

#### D. EJEMPLO DE CÁLCULO DE LA POTENCIA DEL MOTOR

Fuerza ejercida sobre la pastilla **F1**.

$$F1 = P \cdot A$$

La Presión **P** se toma del manómetro del líquido de frenos, para el ejemplo se utiliza  $P = 60 \text{ psi}$  y el área del pistón en la mordaza del freno es  $A = 0,003\,456 \text{ m}^2$ .

$$F1 = \left( 60 \text{ psi} \cdot \frac{4,448\,2 \text{ N}}{1 \text{ lbf}} \cdot \frac{(1 \text{ in})^2}{(0,025\,4 \text{ m})^2} \right) \cdot 0,003\,456 \text{ m}^2 = 1\,429,7 \text{ N}$$

Fuerza de fricción **Fr1**.

$$Fr1 = N \cdot \mu$$

Ya que la normal **N** se toma igual a la fuerza **F1** ejercida por la bomba de freno sobre la pastilla y tomando un coeficiente de fricción  $\mu = 0,32$ .

$$Fr1 = 1\,429,7 \text{ N} \cdot 0,32 = 457,5 \text{ N}$$

Par **T**. Donde la distancia desde el centro del eje del cigüeñal al centroide de la pastilla del freno es  $d = 0,143 \text{ m}$  y la fuerza de fricción es la calculada para cada pastilla del freno ( $Fr1$ ).

$$T = Fr1 \cdot d \cdot 2$$

$$T = 457,5 \text{ N} \cdot 0,143 \text{ m} \cdot 2 = 130,8 \text{ N.m}$$

Potencia del motor **P**. La velocidad angular  $\omega$  para el ejemplo de cálculo es  $\omega = 2\,500 \text{ min}^{-1} \cdot \frac{2\pi \text{ rad}}{1 \text{ rev}} \cdot \frac{1 \text{ min}}{60 \text{ s}} = 261,80 \text{ rad/s}$

$$P = T \cdot \omega$$

$$P = 130,8 \text{ N.m} \cdot 261,80 \text{ rad/s} = 34,2 \text{ kW}$$

## E. FACTORES DE CORRECCIÓN DE POTENCIA

Definición del factor  $\alpha$  para la corrección de la potencia. Factor por el cual se debe multiplicar la potencia observada, para determinar la potencia del motor bajo las condiciones atmosféricas de referencia especificadas en el numeral 9.6.2 La potencia corregida (es decir, la potencia bajo las condiciones de referencia),  $P_{\text{ref}}$ , está dada por:

$$P_{\text{ref}} = \alpha P_y$$

Dónde:

$\alpha$ : Factor de corrección.

$P_y$ : Potencia media (observada).

Condiciones atmosféricas de referencia.

Temperatura. La temperatura de referencia,  $T_{\text{ref}}$ , es 298 K (25 °C).

Presión seca.  $P_{d,\text{ref}}$ , es 99 kPa.

Nota. La presión seca es basada en una presión total de 100 kPa y una presión de vapor de 1 kPa.

Condiciones atmosféricas de ensayo.

Temperatura,  $293 \text{ K} \leq T \leq 303 \text{ K}$ .

Presión atmosférica, entre 101,5 kPa y 101,7 kPa

Presión seca  $P_d$ ,  $100,5 \text{ kPa} \leq P_d \leq 100,7 \text{ kPa}$ .

Factor de corrección  $\alpha$ . Para motores de ignición por chispa se debe calcular a partir de la fórmula:

$$\alpha = \left( \frac{99}{P_d} \right)^{1.2} \left( \frac{T}{298} \right)^{0.6}$$

Dónde:

T: Temperatura absoluta, en grados Kelvin, en la entrada del aire al motor.

$P_d$ : Presión atmosférica seca, en kilopascales, es decir, la presión barométrica total menos la presión del vapor de agua.

Esta fórmula se aplica a los motores carburados y a otros en los que el sistema de regulación está diseñado para mantener una relación aire/combustible, relativamente constante ante los cambios en las condiciones ambientales.

Esta fórmula sólo se aplica si:

$$0,93 \leq \alpha \leq 1,07$$

Si se exceden estos límites, se debe dar el valor corregido obtenido y las condiciones de ensayo (presión y temperatura), con precisión en el informe de ensayo.

Factor atmosférico  $f_a$ . El factor atmosférico que indica el efecto de las condiciones ambientales (presión, temperatura y humedad) sobre el aire que saca el motor, se debe calcular a partir de la fórmula que se da a continuación.

Para motores con aspiración natural, motores con presión de carga mecánica y motores turbocargados, con salidas de desechos funcionando.

$$f_a = \left( \frac{99}{P_d} \right) \left( \frac{T}{298} \right)^{0.7}$$

Dónde:

T: Temperatura absoluta, en Kelvins, en la entrada del aire al motor.

$P_d$ : Presión atmosférica seca, en kilopascales, es decir, la presión barométrica total menos la presión del vapor de agua.

F. Datos de operación del motor con el sistema de encendido original.

Apertura de la válvula mariposa: 1ª		
$min^{-1}$	Carga (kg)	Presión (psi)
867	0	0
810	10	10
837	20	22
667	30	37
507	40	53

Apertura de la válvula mariposa: 2ª		
$min^{-1}$	Carga (kg)	Presión (psi)
1817	0	0
1827	10	10
1713	20	25
1317	30	37
970	40	50

Apertura de la válvula mariposa: 3ª		
$min^{-1}$	Carga (kg)	Presión (psi)
2577	0	0
2473	10	13
2080	20	33
1570	30	47
1180	40	63

Apertura de la válvula mariposa: 4ª		
$min^{-1}$	Carga (kg)	Presión (psi)
3175	0	0
3140	10	10
2805	20	30
2215	30	40
1835	40	60

G. Datos de operación del motor con el sistema de encendido MSD.

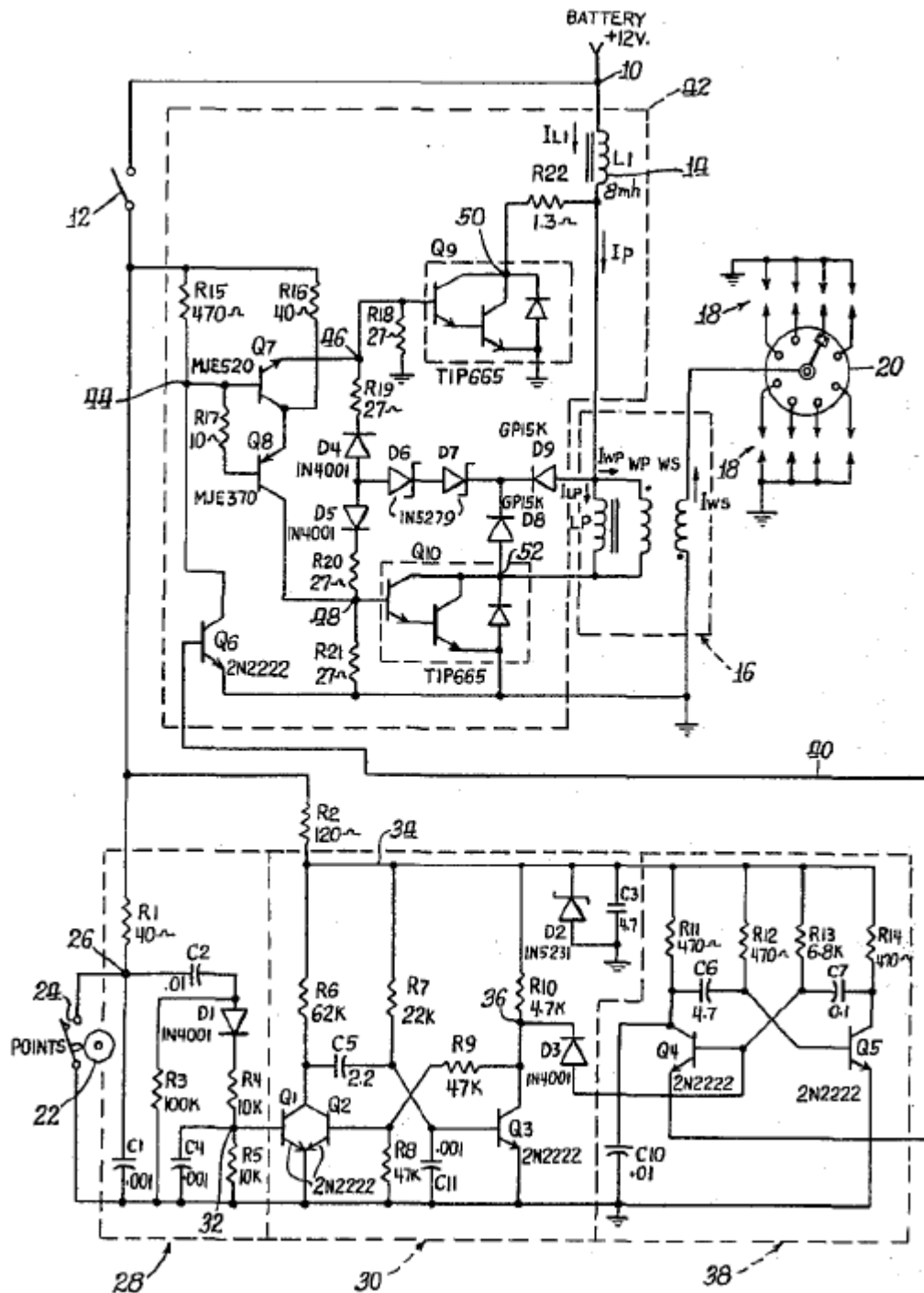
Apertura de la válvula mariposa: 1ª		
$min^{-1}$	Carga (kg)	Presión (psi)
718	0	0
750	10	10
700	20	20

Apertura de la válvula mariposa: 2ª		
$min^{-1}$	Carga (kg)	Presión (psi)
2000	0	0
2000	10	10
2250	20	20
2400	30	45

Apertura de la válvula mariposa: 3ª		
$min^{-1}$	Carga (kg)	Presión (psi)
2395	0	0
2450	10	10
2233	20	30
1870	30	45
1850	40	60

Apertura de la válvula mariposa: 4ª		
$min^{-1}$	Carga (kg)	Presión (psi)
3150	0	0
3100	10	10
2868	20	30
2432	30	40
1975	40	60

## H. CIRCUITO DE UN SISTEMA DE ENCENDIDO MULTICHISPA



MERRICK, James W. Multiple spark discharge ignition system. Autotronic controls, Corp., 1979.